

**T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SCGA590®
MALZEMESİNİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal BİTİRİM

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Tez Danışmanı : Doç. Dr. Nuri AKKAŞ

Mart 2024

T.C.
SAKARYA UYGULAMALI BİLİMLER ÜNİVERSİTESİ
LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SCGA590®
MALZEMESİNİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDA
MEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Bilal BİTİRİM

Enstitü Anabilim Dalı : MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ

Bu tez 06/03/2024 tarihinde aşağıdaki jüri üyeleri tarafından oy birliği ile kabul edilmiştir.

JÜRİ	BAŞARI DURUMU
Jüri Başkanı: Doç. Dr. Nuri AKKAŞ	BAŞARILI
Üye: Prof. Dr. Salim ASLANLAR	BAŞARILI
Üye: Dr. Öğr. Üyesi Serkan APAY	BAŞARILI

BEYAN

Tez içindeki tüm verilerin akademik kurallar çerçevesinde tarafımdan elde edildiğini, görsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçların akademik ve etik kurallara uygun şekilde sunulduğunu, kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapılmadığını, başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunulduğunu, tezde yer alan verilerin bu üniversite veya başka bir üniversitede herhangi bir tez çalışmasında kullanılmadığını beyan ederim

Bilal BİTİRİM

06/03/2024

TEŞEKKÜR

Yüksek lisans eğitimim boyunca değerli bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım, her konuda bilgi ve desteğini almaktan çekinmediğim, araştırmanın planlanmasından yazılmasına kadar tüm aşamalarında yardımlarını esirgemeyen, teşvik eden, aynı titizlikte beni yönlendiren değerli danışman hocam Doç. Dr. Nuri AKKAŞ ve Prof. Dr. Salim ASLANLAR' a teşekkürlerimi sunarım.

Laboratuvar olanakları konusunda anlayış ve yardımlarını esirgemeyen Sakarya Uygulamalı Bilimler Üniversitesi Makine Mühendisliği Bölüm Başkanı Prof. Dr. Ahmet KOLİP'e ve tezimde kullanmış olduğum malzemelerin temininde bana yardımcı olan Öğr. Gör. İbrahim ACAR'a teşekkür ederim.

Ayrıca her koşulda beni destekleyen ve bu süreçte psikolojik desteklerini benden eksik etmeyen babam Kemal BİTİRİM'e ve canım annem Muradiye BİTİRİM'e, tez yazım sürecinde benden desteğini esirgemeyen başta Sümeyye KILIÇ olmak üzere yanımda olan tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	ii
KISALTMALAR	iv
SİMGELER	v
TABLolar LİSTESİ.....	vi
ŞEKİLLER LİSTESİ.....	vii
ÖZET.....	viii
ABSTRACT	ix

BÖLÜM 1.

GİRİŞ	1
1.1. Literatür Araştırması	2

BÖLÜM 2.

ÇİFT FAZLI ÇELİKLER.....	5
2.1. Çift Fazlı Çeliklerin Sınıflandırılması.....	5
2.2. Çift Fazlı Çeliklerin Üretim Yöntemleri	5
2.3. Çift Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri	6
2.4. Çift Fazlı Çeliklerin Mikroyapısı	7
2.5. Çift Fazlı Çeliklerin İşlenmesi	8

BÖLÜM 3.

DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI.....	11
3.1. Direnç Nokta Kaynağının Tanımı ve Çalışma Prensibi	12
3.2. Direnç Nokta Kaynağı Parametreleri	14
3.2.1. Kaynak akımının etkisi	14
3.2.2. Kaynak süresinin etkisi	15
3.2.3. Elektrot kuvvetinin etkisi	15
3.2.4. Elektrot bileşiminin ve elektrot şeklinin etkisi	16
3.2.5. Metal bileşiminin ve elektriksel özelliklerin etkisi	17
3.2.6. Metallerin yüzey özelliklerinin etkileri.....	17
3.2.7. Metal kalınlığının etkileri.....	17
3.2.8. Kaynak geometrisi.....	18
3.2.9. Nokta direnç kaynağında penetrasyon ve elektrot dalma derinliği.....	20
3.3. Mikroyapı	22
3.4. Direnç Nokta Kaynağı Bağlantı Noktalarının Mekanik Özellikleri.....	25
3.4.1. Çekme yükü taşıma kapasitesi	26

3.4.2. Çekmede Kesme Yetmezliği Davranışı	26
3.4.3. Sertlik Profili.....	27

BÖLÜM 4.

ÇENTİK DARBE TESTİ	29
4.1. Charpy Darbe Testi	29
4.2. Izod Darbe Testi	31
4.3. Çift Çekiçli Çentik Darbe Testi.....	33
4.4 Darbe Dayanımına Etki Eden Faktörler	35

BÖLÜM 5.

DENEYSEL ÇALIŞMALAR.....	37
5.1. Malzemenin Bileşimi ve Kimyasal Özellikleri	37
Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan SCGA590 (DP600) çift fazlı galvanizli çelik kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de ve kullanılan malzemenin mekanik özellikleri Tablo 5.2’de yer almaktadır. Her bir numune başlangıçta 1.2x100x200 mm boyutlarında kesilmiştir. 1.2x100x200 mm boyutundaki numunenin teknik resmi Şekil 5.1’de verilmiştir.	37
5.2. Numunelere Uygulanan Abkant Büküm İşlemi	38
5.3. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi.....	39
5.4. Numunelere Çift Çekiçli Çentik Darbe Testinin Uygulanması	39
5.5. Numuneye Ait Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri	44
5.6. Malzemeye İlişkin Mikrosertlik Sonuçları.....	47

BÖLÜM 6.

SONUÇLAR VE ÖNERİLER	50
KAYNAKLAR	51

KISALTMALAR

AHSS	: Advanced High Strength Steel
ASTM	: American Society for Testing and Materials
BM	: Base Material
CCT	: Continuous Cooling Transformation
HAZ	: Isıdan Etkilenen Merkez Bölge
DP	: Dual Phase
FZ	: Kaynak Bölgesi
HAZ	: Isıdan Etkilenen Bölge
HSLA	: High Strengths Low Alloy
IF	: Arayüz Arızası
IHAZ	: Isıdan Etkilenen İç Bölge
OHAZ	: Isıdan Etkilenen Dış Bölge
PF	: Çekme Arızası
P-IF	: Kısmi Arayüz Arızası
RSW	: Resistance Spot Welding
SEM	: Scanning Electron Microscope
TRIP	: Transformation Induced Plasticity

SİMGELER

A	: Elektrik İletkenliği ($m / \Omega mm^2$)
D	: Çap
I	: Kaynak Akımı
kN	: Kilonewton
kVA	: Kilovoltamper
mm	: Milimetre
ms	: Milisaniye
P	: Yük
R	: Direnç
t	: Zaman
Q	: Isı Girdisi
ρ	: Yoğunluk
σ	: Gerilme

TABLÖLAR LİSTESİ

Tablo 2.1 : DP ve TRIP çeliklerinin mekanik özellikleri.....	7
Tablo 5.1 : Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.....	37
Tablo 5.2 : Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri.....	37
Tablo 5.3 : Darbe testi sonucunda elde edilen dayanım değerleri.....	43
Tablo 5.4 : SCGA590 numunesine ilişkin mikrosertlik sonuçları.....	49



ŞEKİLLER LİSTESİ

Şekil 2.1 : DP çeliğinin mikro yapısı.....	7
Şekil 2.2 : Kritikler arası tavlama işlemi	9
Şekil 2.3 : DP çeliğinin kritikler arası tavlama işlemi.....	9
Şekil 3.1 : Direnç nokta kaynağı için temel tek darbeli kaynak çevrimi.....	11
Şekil 3.2 : Direnç nokta kaynağı işlemlerinin şematik gösterimi.....	12
Şekil 3.3 : RSW'nin şematik gösterimi.....	13
Şekil 3.4 : Sıkıştırma yükünün külçe oluşumu üzerindeki etkisi.....	19
Şekil 3.5 : Giriş akımının külçe oluşumu üzerindeki etkisi.....	20
Şekil 3.6 : RSW'de penetrasyon.....	20
Şekil 3.7 : RSW'deki elektrot dalma derinliği.....	21
Şekil 3.8 : Direnç nokta kaynaklarının tipik makro yapısı.....	22
Şekil 3.9 : 3 tabakalı direnç nokta kaynak bağlantısının mikrogramı.....	23
Şekil 3.10 : DP600 çelik bağlantısının ayırt edici mikro yapısı.....	25
Şekil 3.11 : Üç farklı arıza modunun diyagram açıklaması	27
Şekil 3.12 : Direnç nokta kaynaklarının tanımlayıcı sertlik profilinin diyagramı.....	28
Şekil 4.1 : Charpy darbe testi kurulumu.....	30
Şekil 4.2 : Charpy tipi test numunesinin boyutları.....	30
Şekil 4.3 : Izod darbe test cihazı.....	32
Şekil 4.4 : Izod tipi test numunesinin boyutu.....	33
Şekil 4.5 : Çift çekiçli çentik darbe test cihazının görüntüsü.....	33
Şekil 4.6 : Çift çekiçli darbe test makinesi prensibi.....	35
Şekil 4.7 : Z şeklinde bükülmüş kaynaklı sac.....	35
Şekil 5.1 : 1.2x100x200 mm boyutlarında kesilmiş numune.....	37
Şekil 5.2 : Numuneye verilen büküm açısının gösterimi.....	38
Şekil 5.3 : Abkant büküm yapılan numunenin yakın mesafeden görüntüsü.....	38
Şekil 5.4 : Numuneye uygulanan nokta direnç kaynağı işlemi.....	39
Şekil 5.5 : Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin görüntüsü.....	41
Şekil 5.9 : Tez kapsamında kullanılan çift çekiçli darbe test cihazının görüntüsü.....	41
Şekil 5.7 : Çift çekiçli darbe test cihazının test sonrası konumu.....	42
Şekil 5.8 : Darbe testi sonrasında numunede meydana gelen ayrılma.....	42
Şekil 5.9 : Kaynak zamanı - darbe dayanımı grafiği.....	43
Şekil 5.10 : Ana metalin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi görüntüsü.....	44
Şekil 5.11 : Ana metalin elementel haritalama analizi sonuçları ve EDS paterni.....	44
Şekil 5.12 : Kaynak süresi 10 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.....	45
Şekil 5.13 : Kaynak süresi 15 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.....	45
Şekil 5.14 : Kaynak süresi 20 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.....	46
Şekil 5.15 : Kaynak süresi 25 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.....	46
Şekil 5.16 : Kaynak süresi 30 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.....	47
Şekil 5.17 : Brinell sertlik ölçme yönteminin şematize edilmesi.....	48
Şekil 5.18 : Kullanılan mikrosertlik ölçüm cihazının görüntüsü.....	49

OTOMOTİV SEKTÖRÜNDE KULLANILAN SCGA590®MALZEMESİNİN DİRENÇ NOKTA KAYNAĞINDAMEKANİK ÖZELLİKLERİNİN İNCELENMESİ

ÖZET

Çift fazlı çelikler, gelişmiş yüksek dayanımlı çelikler ailesinin (AHSS) en yaygın kullanılan üyesidir. Otomotiv sektöründe önemli bir yer tutan bu çelikler genel olarak otomobil dış tavan, dış kapı, yan gövde ve taban paneli yapımında kullanılmaktadır. Genellikle düşük karbonlu çeliğin termomekanik olarak işlenmesiyle elde edilirler ve mikro yapıları yumuşak sürekli ferrit matris ve bunun üzerindeki sert martenzit adacıklarından oluşur. Bu heterojen kompozit benzeri mikro yapı, malzemenin aynı anda hem iyi şekillendirilebilirlik hem de yüksek mukavemet değerlerine ulaşmasını sağlar. Genellikle yüksek akma mukavemeti, yüksek çekme mukavemeti, yüksek gerinim sertleşmesi ve uzama özellikleriyle karakterize edilirler. Çift fazlı çeliklerin mühendislik özellikleri, işleme proseslerine ve dolayısıyla mikro yapılarına bağlı olarak büyük ölçüde değişiklik gösterir. Genel olarak 2 farklı üretim yolu takip edilmektedir. Birincisi sıcak haddeleme sonrası sürekli tavlama, ikincisi ise sıcak haddeleme, kesikli tavlama ve son olarak soğuk haddelemedir. Bazı proseslerde çeliğin sünekliğini arttırmak için kısa süreli temperleme de uygulanabilmektedir. Üretim sürecinde kritikler arası bölgede tavlama büyük önem taşımakta olup, A1-A3 sıcaklıkları 1. bölgeden tavlama sonrası su verilmesiyle ferritik-martensitik mikro yapı elde edilmektedir. Modern otomotiv endüstrisinde metal bileşenlerin montajı için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Özellikle, direnç nokta kaynağı, diğer yöntemlere kıyasla distorsiyonu azaltırken, farklı bileşim ve kalınlıktaki metal parçaların hızlı ve etkili bir şekilde birleştirilmesindeki etkinliği nedeniyle tanınmaktadır. Araç boyutu, otomotiv endüstrisindeki nokta kaynaklı bağlantılar bağlamında çok önemli bir rol oynar. Bu rol, birleştirilecek bileşenlerin sayısı ve üretici tarafından seçilen üretim süreci gibi değişkenlere bağlıdır. direnç Nokta kaynağı, karşıt kuvvetleri kullanarak metal levhaları doğrudan eritmek için elektrik akımı kullanan bir işlemdir. Bu çalışma kapsamında otomotiv sektöründe yaygın kullanılan SCGA590® çift fazlı galvanizli çelik saclar kullanıldı. Deneylerimiz 120 kVA gücünde, elektronik kontrollü, pedal sistemli punta kaynak makinesi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Kaynak işlemi farklı döngülük dizilerle ve farklı periyotlarla gerçekleştirildi. Bunu takiben numuneleri, oda sıcaklığı altında darbe özelliklerini değerlendirmek için çift çekiçli çentik darbe cihazı kullanılmış ve farklı periyot, akım koşullarında direnç nokta kaynaklı numunelerin kaynaklılılığı üzerine elde edilen sonuçlar rapor edilmiştir. Kaynak bölgesi ve ana metalin hem yapısında bulunan elementlerin tayin edilmesi amacıyla hem de farklı periyot ve akım miktarlarının malzeme mikroyapısında neden olduğu değişimleri gözlemlemek amacıyla numuneler taramalı elektron mikroskopu analizi ile test edilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Çift fazlı galvanizli çelikler, Direnç nokta kaynağı

INVESTIGATION OF THE MECHANICAL PROPERTIES OF SCGA590[®] MATERIAL USED IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY IN RESISTANCE SPOT WELDING

ABSTRACT

Dual-phase steels are the most widely used members of the advanced high-strength steels (AHSS) family. These steels, which have an important place in the automotive industry, are generally used in the production of automobile exterior ceilings, exterior doors, side bodies, and floor panels. They are generally obtained by the thermomechanical processing of low-carbon steel, and their microstructure consists of a soft continuous ferrite matrix with hard martensite islands. This heterogeneous composite-like microstructure allows the material to simultaneously achieve good formability and high strength. They are generally characterized by high yield strength, maximum tensile strength, and high strain hardening and elongation properties. The engineering properties of dual-phase steels vary greatly depending on their machining processes and, therefore, their microstructure. In general, two different production methods are followed. The first is continuous annealing after hot rolling; the second is hot rolling, followed by discontinuous annealing, and finally cold rolling. In some processes, short-term tempering can also be applied to increase the ductility of steel. Annealing in the intercritical region is of great importance in the production process, and a ferritic–martensitic microstructure is obtained by applying water after annealing in the 1st zone at A1–A3 temperatures. Various methods for assembling metal components have been used in the modern automotive industry. In particular, resistance spot welding is recognized for its effectiveness in quickly and effectively joining metal parts of different compositions and thicknesses while reducing distortion compared with other methods. Vehicle size plays a critical role in spot-welded joints in the automotive industry. This role depends on variables such as the number of components to be assembled and the manufacturing process chosen by the manufacturer. Resistance spot welding is a process that uses electric current to directly melt metal sheets using opposing forces. Within the scope of this study, we used SCGA590 dual-phase galvanized steel sheets, which are widely used in the automotive industry. Our experiments used a 120 kVA power, electronically controlled, pedal system spot welding machine. The welding process was performed in different cycle sequences and periods. Subsequently, a double-hammer impact notching device was used to evaluate the impact properties of the samples at room temperature, and the results obtained on the weldability of resistant spot welded samples under different periods and current conditions were reported. The samples were tested using scanning electron microscopy analysis to determine the elements in the structure of the weld area and the base metal and to observe the changes caused by different periods and current amounts in the material microstructure.

Key Words: Dual phase galvanized steels, Resistance spot welding

BÖLÜM 1. GİRİŞ

Çift fazlı çelikler veya DP çelikleri, iki fazdan oluşan yüksek mukavemetli çeliklerin bir sınıfı olarak tanımlanır; normalde bir ferrit matrisi ve dağılmış bir ikinci martensit fazı ve az miktarda tutulan ostenit içermektedir. DP çelikleri 1970'lerde geliştirilmiştir. Bu ilerleme, şekillendirilebilirliği azaltmadan veya maliyetleri artırmadan yeni yüksek mukavemetli çeliklere duyulan ihtiyaçtan kaynaklanmaktadır. Daha da önemlisi otomotiv endüstrisi, şekillendirilebilirliği sağlamak için yüksek çekme mukavemeti-uzama, yorulma ve çarpma direnci oluşturmak için yüksek çekme mukavemeti, üretim maliyetini etkilemeden kaynaklanabilirliği garanti etmek için düşük alaşım içeriğine sahip çelik kaliteleri talep etmiştir. Yıllar sonra DP çeliklerine olan talebin hala güçlü şekilde devam ettiği görülmektedir. Malzemeler, yüksek mukavemet ve son derece etkili şekillendirilebilirlik özelliklerini bir araya getirerek araçların ağırlığını azaltmıştır. Bu özellikler ve nitelikler, DP çeliğini otomotivle ilgili sac şekillendirme işlemleri ve bunların işlevselliği için ideal malzemeler haline getirmiştir [1,2]. DP çeliklerinin spesifik kullanım alanlarına bakıldığında gövde ve şasi parçalarında kullanıldığı görülmektedir. Bu parçalar arasında kapı panelleri, çamurluklar, tavan panelleri, şasi elemanları ve yan etekler gibi yapısal bileşenler yer alır. Çift fazlı çelikler, bu bölgelerde mükemmel mukavemet ve dayanıklılık sağlayarak çarpışma direncini artırabilir. Çarpışma direncini artırmak amacıyla otomobillerde çarpışma güvenliği yapılarında kullanılır. Bu yapılar genellikle ön ve yan çarpışma bölgelerinde yer alır. Otomobil kapılarında kullanılan iç mekanizmalar, çift fazlı galvanizli çeliklerle güçlendirilebilir. Bu, kapıların dayanıklılığını ve çarpışma durumlarında yolcuları koruma yeteneklerini artırabilir. Çift fazlı galvanizli çelikler, otomobil egzoz sistemlerinde kullanılabilir. Bu çelik türü, yüksek sıcaklıklara ve korozyona karşı direnç sağlar, böylece egzoz sistemlerinin dayanıklılığını artırır. Çift fazlı galvanizli çelikler, otomobilin çatı yapısı ve yan kirişler gibi bölgelerde kullanılabilir.

Bu, aracın genel yapısal mukavemetini güçlendirir. Özellikle ticari araçlarda ve hafif ticari araçlarda, çift fazlı galvanizli çelikler, yük taşıma kapasitesini artırmak ve yapısal dayanıklılığı sağlamak amacıyla kullanılabilir. Bu çalışmada otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan çift fazlı galvanizli çelik grubunda yer alan SCGA590 malzemesinin farklı kaynak akım şiddeti ve akım süreleri altında elektrik direnç nokta kaynağında mekanik özellikleri incelenmiştir. Akım şiddeti ve süresinin değiştirilmesi ile birlikte yapıda meydana gelen mikroyapı, sertlik değişimleri de çalışmanın sonunda raporlanmıştır.

1.1. Literatür Araştırması

Direnç nokta kaynağı üzerine literatürde yer alan bazı çalışmalar aşağıda özetlenmiştir.

1999 yılında Salim Aslanlar'ın "Galvanizli kromatlı olan mikro alaşım çeliklerin elektriksel direnç nokta kaynağında uygun arıza modunun belirlenmesi" başlıklı doktora tezinde, kromat kaplı mikro alaşımlı çeliklerin kaynak parametreleri ve kromatlı mikro alaşımlı çelik sacların elektrik direnç nokta kaynağında bağlantı mekanik değerleri incelenmiştir [2].

2014 yılında Nuri Akkaş tarafından gerçekleştirilen "Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Atmosferik Korozyona Dayanıklı Çelik Sacların Birleştirilme Kabiliyetinin İncelenmesi" isimli doktora tezinde, TÜVASAŞ'da üretilen raylı sistem araçlarında kullanılan atmosferik korozyona dayanıklı çelik sacların elektro-direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi incelenmiştir. Çekirdek boyutlarının bağlantının dayanımına etkisi belirlenmiş ve uygun kaynak şiddeti ile zamanı önerilmiştir [3].

2018 yılında Gül, farklı akım şiddetlerinde ve farklı kaynak hızlarında 1200 M çelik levhanın birleşim yerlerinde yoğun dendritik yapılar görmüş ve buna göre optimum akım şiddetlerini ve hızlarını belirlemiştir [5].

2018 yılında Onar'ın doktora tezinde, farklı kalınlıktaki levhaların direnç nokta kaynağı ile birleştirilmesi için farklı kaynak süreleri ve etkileri incelenmiştir. Çalışma sonucunda optimal kaynak süresi belirlenmiş ve sonuçlar bu çalışmanın geçerliliğini doğrulamıştır [6].

1989 yılında Cho ve diğerleri, direnç nokta kaynağında düzensiz akım yollarından kaynaklanan mikroyapısal ve faz geçiş sorunları gibi termal hareketin tahmin edilebilirliğini araştırmışlar ve kaynak penetrasyonunun çekirdek boyutu ile önemli ölçüde ilişkili olduğunu bulmuşlardır [7].

2002 yılında Dong ve diğerleri, direnç nokta kaynağı sırasında nikel kaplı çeliğin elektrot yapışma durumunu bir dizi değişken parametre kullanarak incelemiştir. Sonuç olarak, kaynak akımını ve süresini azaltarak elektrot basıncını artırarak elektrot boşluğunu azaltarak yapışmayı azaltabilmişlerdir [8].

2021 yılında Fatih Enes Alemdar tarafından gerçekleştirilen yüksek lisans tezi, "DP ve Strenx Çeliklerinin Direnç Nokta Kaynağında Mekanik Özelliklerinin İncelenmesi" başlığını taşımaktadır. Bu çalışmada, kaynaklanan birleştirmelerin mekanik kabiliyetleri belirlenmek amacıyla çekme-sıyırma deneyi ve çekme-makaslama deneyleri gerçekleştirilmiş ve kaynak süresi ile kaynak akım şiddeti arasında optimum değerlere ulaşılmıştır." [9].

Dong ve ekibinin gerçekleştirdiği "Electrode Sticking During Micro-Resistance Welding of Thin Metal Sheet" adlı çalışmada, ince bir nikel kaplama işlemi uygulanmış çelik numuneler üzerinde mikro elektrik direnç kaynağı işlemi sırasında yapışma özelliği gösteren elektrodun etkilerini engellemek amacıyla kaynak akımı, elektrot mesafesi, kaynak zamanı, elektrot basınç kuvveti ve elektrot tipi gibi çeşitli değerlere odaklanılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre, nikel kaplama ile çelik sac arasında oluşan bağlantıdan kaynaklanan yapışma işlemi gözlemlenmiştir. Yapışma işlemini azaltmak için kaynak akımı ve süreyi azaltarak elektrot boşluğunu arttırmak etkili olmuştur. Ayrıca, sıradan elektrotlar (CuCrZr) üzerine uygulanan TİC kaplama işlemi ile yapışma işleminin tamamen ortadan kalktığı gözlemlenmiştir [10].

2018 yılında Kekik M. tarafından gerçekleştirilen "1200M-DP800 HF Saclarının Elektrik Direnç Nokta Kaynak Yöntemiyle Birleştirilmesinde Hasar Modunun Tespiti" adlı yüksek lisans tezinde, deney numunelerinin Elektrik Direnç Nokta Kaynağı (EDNK) ile birleştirilmesi sırasında ortaya çıkan hasar modları araştırılmıştır. Çalışmada, elektron baskı kuvveti değeri sabit tutularak kaynak süresi ve kaynak akım şiddeti değerleri değişken olarak alınmıştır. Ayrıca, makaslama-çekme ve sıyırma-çekme kuvvetlerini analiz ederek kaynak çekirdeği gözlemlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, maksimum

sıyırma-çekme kuvvetinin makaslama-çekme kuvvetinden daha düşük olduğu belirlenmiştir.

Kaynak zamanının etkisi ve kaynak akım şiddeti ile birlikte kaynak çekirdeği boyutlarının azalması, makaslama-çekme ve sıyırma-çekme kuvvetlerinin azaldığını göstermiştir." [11].

Xin Sun ve ekibinin araştırmasında kullanılan numunelerde Elektrik Direnç Nokta Kaynağı (EDNK) altında makaslama-kesme yükü etkisiyle enerji absorbe edebilme ve füzyon altındaki bölgedeki boyutta kaynağa ait hataların etkilerini incelemişlerdir. Tüm deney sonuçlarına göre, deney numunelerinin ergime alanının büyüklüğüne bağlı olarak maksimum enerji ve yük absorbe edebilme karakteristiği, kaynak kalitesini belirleyen en önemli faktör olarak gözlemlenmiştir" [12].

Selahaddin Anık ve ekibinin gerçekleştirdiği "Study Of Contact Resistance In Electrical Resistance Spot Welding" adlı çalışmada, düşük alaşım içeren sac malzemelerin nokta kaynağı uygulamalarında ortaya çıkan temas direnci sorununu çeşitli yüzey değerlerinde yapılan deneylerle incelemişlerdir. Yapılan çalışmalarda, makaslama-çekme mukavemeti ile temas direnci arasında herhangi bir etkileşim olmadığını tespit etmişler ve pürüzlülük değerlerinin artmasının temas direnç değerlerini de arttığını belirlemişlerdir." [13].

BÖLÜM 2. ÇİFT FAZLI ÇELİKLER

2.1. Çift Fazlı Çeliklerin Sınıflandırılması

DP çeliklerinin nihai çekme mukavemetine göre DP 600, DP 1000 ve benzeri birçok çeşidi bulunmaktadır. DP çelikleri, 400 - 440 MPa aralığındaki geleneksel yüksek dayanımlı çeliklerle karşılaştırıldığında, DP 1000 için 1000 MPa'nın üzerinde ve DP 600 için 600 MPa'nın üzerinde çekme dayanımına sahiptir. Ancak aynı üretim gücüne sahiptirler ve hafif araçlar için iyi bir kesit olarak kabul edilirler [9,10]. Sonuç olarak, mukavemetini kaybetmeden arabanın ağırlığını azaltan daha ince DP levhaların kullanılması mümkündür. Ayrıca benzer veya daha yüksek enerji kaza emiliminden de yararlanırlar. Sanayiciler, yüksek seviyeli çelik esaslı parçaların (AHSS) tasarımının araç dekorasyonu ve daha düşük üretim maliyeti için bir fırsat sunduğu konusunda hemfikirdir. Şu anda TRIP ve DP çelikleri AHSS'ye benzer şekilde sektörde yerini almaktadır. Genel olarak 1300-1500 MPa çelikler için yaklaşık %30-40 oranında ağırlık azalmaları bildirmişlerdir [11]. Bu özellikler DP 600 çeliğinde olup günümüzde tercih edilmektedir. Ayrıca arabaların ve diğer ürünlerin kaynak, formasyon vb. termal özelliklerinin elde edilmesi de önemlidir. Sıcaklığın artmasıyla DP soğuk şekillendirme çeliklerinin mekanik özellikleri hızla değişir ve DP şekilli soğuk çeliklerin yük taşıma kapasitesinin kaybına neden olur [12]. Bu nedenle DP şeklindeki çelik yapıların tasarımı, artan sıcaklıklarla birlikte mekanik özelliklerin termal özelliklerine ilişkin iyi bilgi ve anlayış gerektirir.

2.2. Çift Fazlı Çeliklerin Üretim Yöntemleri

DP çeliklerindeki gelişmeler, mekanik özelliklerden ödün vermeden ucuz alaşımlama kullanılarak olası ağırlık azaltımının bir sonucu olarak otomobil endüstrisinde büyük ilgi görmektedir. DP çeliği esas olarak ferrit ve martenzit yapı olmak üzere iki fazdan meydana gelmektedir.

Bununla birlikte, martensitin yanı sıra, soğutma hızına ve termomekanik işlem yoluna bağlı olarak mikro yapı, tutulan östenit, yeni ferrit, perlit ve beynit gibi az miktarda başka fazlar da içerebilir.

Yazarlardan bazıları DP çeliklerini Ac_1 sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklardan (yani kritikler arası sıcaklık) doğrudan su verme yoluyla üretmişlerdir. Dolayısıyla mikro yapı ferrit ve martenzit fazlarından oluşmaktadır. Diğer araştırmacılar, östenitten istenen ferrit dönüşümüne kadar yavaş (hava) soğutmayı ve ardından kalan östenitin martensite dönüştürülmesi için soğutmayı kapsayan CCT diyagramına dayanarak ve bundan türetilmiş DP çeliklerini üretmişlerdir [13,14]. Teknik olarak sıcak haddelenmiş şeridin önce laminer soğutma, ardından sarma sıcaklığına kadar ultra hızlı soğutma ve daha sonra oda sıcaklığına kadar sarmal soğutması yaparak çift fazlı çeliklerin beynit/ferrit veya martensit/ferrit mikro yapısını üretmeye yönelik sınırlı çalışmaların rapor edildiğini bildirmişlerdir [15]. Çift fazlı çelik eriyiğinin üretimi, dönüştürücüde oksijenle üstten üfleme prosesinde gerçekleşir ve ikincil metalurji prosesinde alaşım işlemine tabi tutulur [16]. DP çelikleri üretmenin yaygın olarak bilinen yolu, düşük alaşımlı çeliklerin soğuk haddelenmesi ve ardından sürekli tavlama hattında kritikler arası tavlama. Kritikler arası terimi, (Fe-C) diyagramındaki östenit/ferritin iki faz alanını ifade eder. Ancak su verme işlemi çeliğin uygun sertleşebilirliği ve yeterli soğuma hızı sağlandığında östenit fazı martenzite dönüşecektir. Sonuç, araştırmada gözlemlenen martensitin sert parçacıklarının gömülü olduğu ferritin yumuşak sürekli fazına sahip bir yapıdır [17].

2.3. Çift Fazlı Çeliklerin Mekanik Özellikleri

DP çelikleri 500 ila 1200 MPa aralığında yüksek bir nihai çekme mukavemetine (UTS) ve ferrit, martensit ve beynit fraksiyonlarına bağlı olan (%12 ~ 34) aralığında toplam uzamaya sahiptir [11].

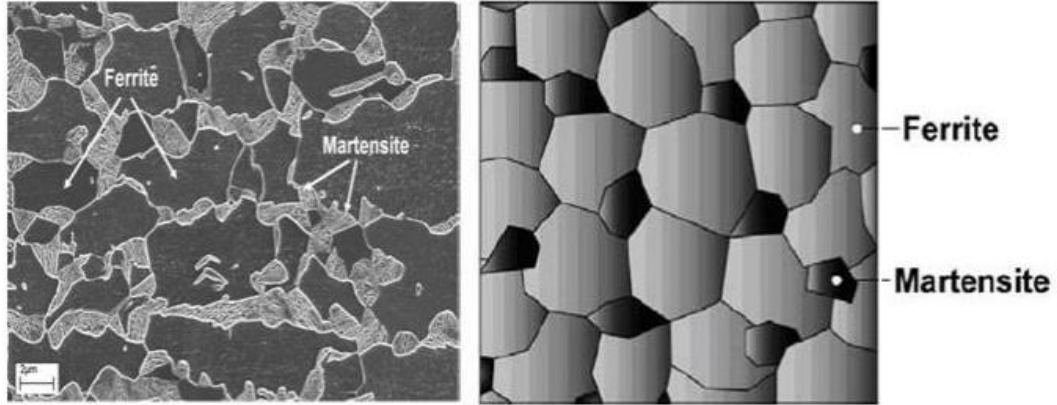
Akma mukavemeti ve nihai çekme mukavemeti artarken, uzamaların tek biçimliliği ve bütünlüğü tamamen azalır [12,13]. DP ve TRIP çeliklerinin mekanik özellikleri Tablo 2.1'de verilmiştir. Eşdeğer geleneksel HSLA çeliklerinden daha yüksek yorulma mukavemetine sahiptirler. Bu avantajlar, bu çelikleri otomotivle ilgili sac şekillendirme işlemleri ve fonksiyonları için ideal malzemeler haline getirmektedir [14].

Tablo 1.1 : DP ve TRIP çeliklerinin mekanik özellikleri [15].

Steel	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
DP 500/800 steel	450	800	14-20
TRIP 450/800 steel	500	800	26-32

2.4. Çift Fazlı Çeliklerin Mikroyapısı

DP çeliklerinin geleneksel mikro yapıları çokgen yumuşak ferritten ve %10-40 oranında sert martenzitten oluşur. Bu tip yapı, 500-1200 MPa aralığında nihai çekme dayanımına ulaşmayı sağlamaktadır. Özel gereksinimleri karşılamak ve mekanik özellikleri değiştirmek amacıyla ferrit-beynit martensit ve ferrit-beynit çelikleri üretilmiştir. Martensit yerine beynitin, mukavemette ve ilerlemede küçük bir azalma ile şekillendirilebilirliği iyileştirdiği ortaya konulmuştur [16,17]. Yoğun olarak çalışılan ve araştırılan DP çeliklerinin mekanik davranışları üzerine martensit fraksiyonu, dağılımı ve martensit bölge büyüklüğünün etkisi ile ferrit fraksiyonu ve tane boyutunun etkisidir [18]. Çift fazlı çeliğin mikro yapı örneği Şekil 2.1'de görülmektedir. Mikroyapıda sert martenzit fazı beyaz alanlar olarak görünür ve gösterilmektedir, yumuşak ferrit fazı ise koyu renk ile gösterilen alanları temsil etmektedir.



Şekil 2.1 : DP çeliğinin mikro yapısı [19].

Teknik olarak DP çeliği düşük veya orta karbonlu bir çelik olarak başlar ve sürekli soğutma dönüşüm diyagramında A_1 sıcaklığının üzerindeki ancak A_3 sıcaklığının altındaki bir sıcaklıkta soğutulur.

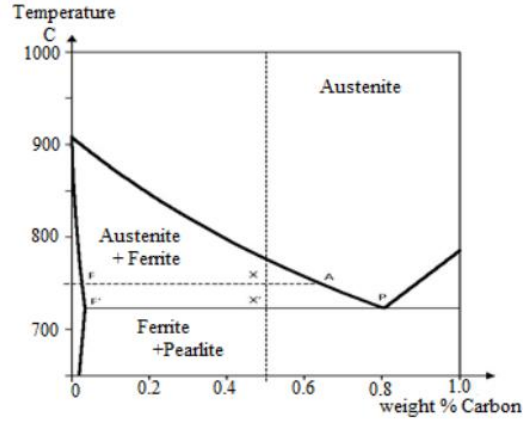
Ancak bu sonuç, ikincil faz olarak martensit adacıkları içeren yumuşak bir ferrit matristen oluşan bir mikro yapıdadır (martensit çekme mukavemetini arttırır). Ayrıca DP çeliğinin genel davranışı hacim oranı, morfoloji, tane boyutu ve karbon içeriği tarafından yönetilir. Bu mikro yapıları elde etmek için DP çelikleri tipik olarak %0,06-0,15 C içerir, böylece martensit ve stabilize edici ostenit fazları güçlendirilir. %1,5-3 Mn, ferritte güçlenmeye ve ostenit fazlarının stabilizasyonuna neden olur. Krom ve molibdenin perlit ve/veya beynit oluşumunu engellediğine inanılmaktadır. Silikon ferrit dönüşümünü destekler. Vanadyum ve niyobyum elementleri tane incelmeye neden olur. Martensit hacim oranı aynı zamanda çift fazlı çeliklerin mukavemetini de etkiler [19,20]. Ferrit matrisinde izole edilmiş alanlar olarak bulunan martensit bölgeleri, ferriti çevreleyen zincir benzeri bir ağ oluşturan martensit bölgelerine göre dayanım ve süneklik arasında daha iyi bir kombinasyona yol açar [21]. Ferrit ve/veya martensit fazlarının tane incelmesi mukavemeti ve sünekliği arttırır [22].

2.5. Çift Fazlı Çeliklerin İşlenmesi

Son yıllarda DP çeliklerinin geliştirilmesine otomotiv endüstrisinde büyük ilgi görülmüştür. DP çeliği ağırlıkça %0,05-0,2 C içeren düşük veya orta karbonlu bir çelikten üretilir. Bu, mekanik özelliklerini kaybetmeden, ucuz alaşım kullanımıyla ağırlık azaltımı potansiyeli olan çelik üretimiyle sonuçlanır.

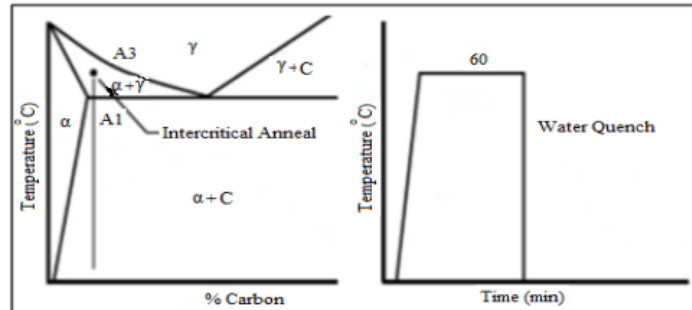
Genel olarak DP çeliği ferrit ve martensit olmak üzere iki fazdan oluşur. Bununla birlikte, martensitin yanı sıra DP çeliğinin mikro yapısı, termos-mekanik işleme ve soğutma oranına bağlı olarak perlit, tutulan ostenit ve yeni ferrit dahil olmak üzere az miktarda başka fazlardan oluşur. DP çelikleri, bazı yazarlar tarafından demir-karbon faz diyagramında çeliğin ostenit bölgesinde ısıtılması ve ardından A_{c1} sıcaklığı (yani kritik sıcaklık) üzerindeki sıcaklıktan doğrudan soğutma yoluyla oluşturulmuştur. Ancak A_3 sıcaklığının altında sabit soğuma dönüşüm diyagramında ve Şekil 2.2'de gösterildiği gibi tam östenitik mikro yapıya ayrılmıştır. Daha sonra çelik ferrit+östenit bölgesine kadar soğutulur ve o sıcaklık derecesinde kalacak ve böylece ferritin ostenit sınırlarında çekirdeklenmesi sağlanabilecektir. Çekirdeklenmeden sonra ferrit ostenit taneciklerini oluşturur.

Bu nedenle mikro yapı ferrit ve martenzit fazlar tarafından süslenecektir. Ayrıca, DP çeliği diğer araştırmacılar tarafından yavaş soğutmayı (hava) östenitten tercih edilen ferrit dönüşümüne ve daha sonra devam eden östenitin martensite dönüştürülmesi için soğumaya kadar kapsayan CCT diyagramına dayalı olarak üretilmiş ve bundan türetilmiştir [23,24].



Şekil 2.2 : Kritikler arası tavlama işlemi [25].

Şekil 2.3'de görüldüğü gibi kritikler arası tavlama işlemi, normalde ince levhalar için kullanılır. Levhanın mikro yapısının ana kısmını tercih edilen kalınlıkta soğuğa döndürülmüş ferrit-perlit karışımı oluşturur. Levha, perlit süspansiyonunun ortaya çıktığı ferrit-östenit alanına ısıtılır. Bu süreç genellikle derinlemesine incelenemeyecek kadar hızlıdır [26]. Tavlama sıcaklığına bağlı olarak perlitin çoğu düşük karbonlu çelikte çözünmesinin on beş saniyeden iki dakikaya kadar sürdüğü varsayılmaktadır. Kritikler arası tavlama sıcaklığının artırılması östenit boyutunu artırır, östenitin karbon içeriğini ve çeliğin direncini azaltır.



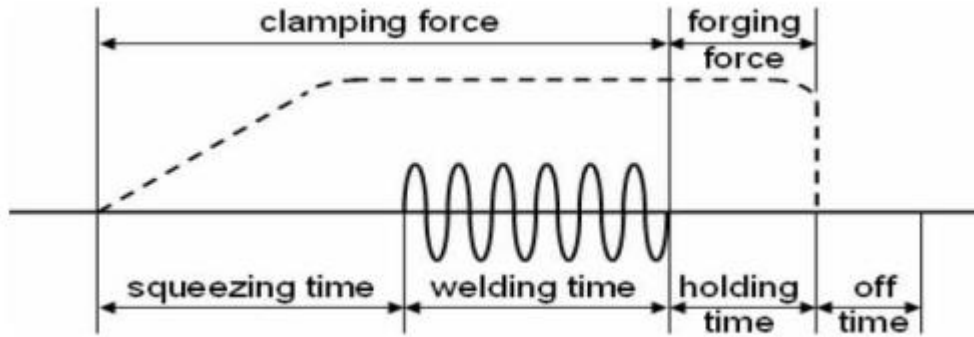
Şekil 2.3 : DP çeliğinin kritikler arası tavlama işlemi [27,28].

Tutulan ostenit genellikle martenzit adalarının kenarlarında bulunur, çünkü bir miktar ostenit soğuma yoluyla ferrite geriler. Ferrit soğudukça karbonu östenit içerisine atar ve bu da yerel martenzit bitiş sıcaklığını oda sıcaklığının altına düşürür [29]. İki işlemi karşılaştırarak, kritikler arası tavlama işleminde ostenit çekirdeklenir ve ferrit tane sınırlarında büyür; ardışık söndürmede ferrit çekirdeklenir ve ostenit tane sınırlarında büyür.

Hacim oranı, sıcaklık ve soğuma oranıyla birlikte tavlama süresi (tutma süresi) ile belirlenir. Daha yüksek tavlama sıcaklığında, ostenitteki karbon içeriği azalacak ancak ostenitin hacim oranı artacaktır. Ara su verme, DP çelikleri üretmek için daha az bilinen üçüncü yaklaşımdır. Bu işlemde, yapının sadece östenitten oluştuğunun belgelenmesi için çeliğin ostenitik alana kadar ısıtılması ve yaklaşık otuz dakika tutulması gerekir. Daha sonra tamamen martensitik bir mikro yapı oluşturacak şekilde oda sıcaklığına kadar söndürülür. Numune, tane sınırlarında ferrit oluşturmak için ferritik/östenitik alanda yaklaşık altmış dakika ısıtılır. Sonunda östeniti tekrar martenzit adalarına dönüştürmek ve DP'nin yapısını tamamlamak amacıyla söndürülür [30,31]. Bu işlem, DP çeliğini kaynak işlemleri gerektirmeyen mineral ve madencilik parçalarında daha yüksek martenzit içeriğiyle ilişkilendirir.

BÖLÜM 3. DİRENÇ NOKTA KAYNAĞI

Direnç nokta kaynağı, temas eden metal yüzeylerin, elektrik akımı direncinden kaynaklanan ısı ile birleştirildiği bir işlemdir. İş parçaları elektrotların uyguladığı basınç altında bir arada tutulur. Geleneksel olarak tabakalar (0,5 ila 3) mm kalınlık aralığındadır. Bu işlem, kaynak akımını küçük bir "noktaya" yoğunlaştırmak ve aynı anda levhaları birbirine kenetlemek için ana şekilli bakır alaşımlı elektrotları kullanır. Punta kaynağının çekici özelliği, çok kısa sürede (yaklaşık 10 ila 100 ms) noktaya iletilebilen enerji miktarıdır. Teknik olarak bu, kaynağın geri kalanının aşırı ısınmadan kaynak yapılmasına olanak sağlar [32]. Başka bir deyişle direnç nokta kaynağı, yüksek amperajın elektrotlar ve levhalar arasından geçmesi yoluyla ısınmaya dayanmaktadır. Temel tek darbeli kaynak çevrimi Şekil 3.1'de açıkça gösterilmiş ve ortaya konmuştur.



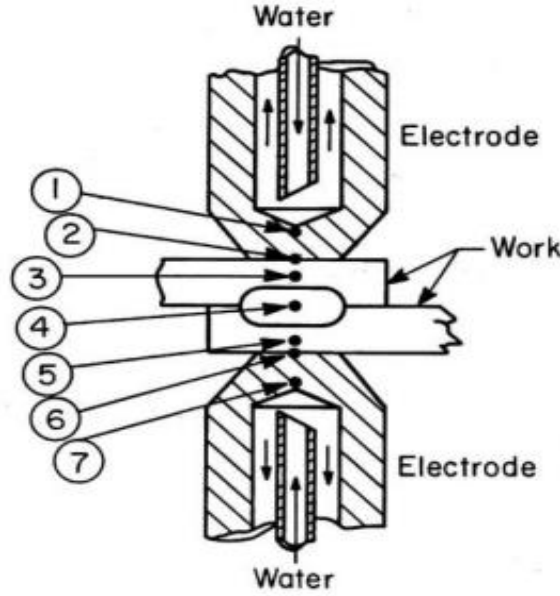
Şekil 2.1 : Direnç nokta kaynağı için temel tek darbeli kaynak çevrimi [33].

Öncelikle, bağlantı arayüzünde temas direnci (R) oluşturulur. Kaynak akımı (I), daha sonra (t) zamanından önce iş parçasına uygulanır. Akımın metal levhalar arasındaki temas direncinden akışı ısınma üretir. Isı girdisi matematiksel olarak aşağıdaki gibi formüle edilir.

$$Q = I^2 \times R \times t \quad (3.1)$$

Metal levhalar arasındaki temas alanının sıcaklığının hızla arttığı ve bağlantı arayüzünde erimiş bir külçe oluşturduğuna dikkat edilmesi teknik açıdan önemlidir.

Daha sonra kaynak akımı durdurulur ve kaynak külçesi/göbeği katılaşırken kaynağı bir süre (tutma süresi) birleştirmek için basınç (dövme kuvveti) sürdürülür. Önemli değişkenler, ısı üreten akım yoğunluğu ve kaynak süresi ile RSW yöntemi için uygulanan elektrot kuvvetleridir. Metal levhalar arasındaki temas direnci esas olarak sıkıştırma kuvvetinden etkilenir. Dolayısıyla sac yüzeyler ve elektrotlar, metalin kalınlığı ve bağlantı uyumu da kaynak kalitesini etkiler, ancak elektrotun baskı kuvveti, kaynak süresi ve kaynak akımı kontrol değişkenleri olarak kullanılır [34]. RSW işleminin çizimi Şekil 3.2'de gösterilmektedir; burada (1) ve (7) elektrotlar, (3) ve (5) kaynak yapılacak iş parçalarıdır, (4) kaynak külçesidir, (2) ve (6) faying arayüzleridir.



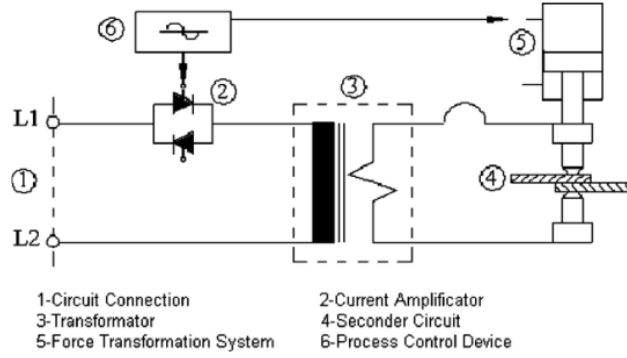
Şekil 3.2 : Direnç nokta kaynağı işlemlerinin şematik gösterimi [33,35].

Şekil 3.2'deki çizimlerde, birleştirilen iş parçası (3 ve 5), elektrotlar (1 ve 7) tarafından toplu olarak mekanik olarak birbirine itilir ve RSW'deki temas yüzeyinden (2 ve 6) bir elektrik akımı geçirilir. Isı, akıma, arayüzün direncine ve akımın akış süresine bağlı olarak arayüzde üretilir. Bu ısı oluşumu nedeniyle arayüz etrafındaki metal parçalar ısınır, bu da erimeye ve kaynak havuzunun oluşmasına neden olur. Akım akışı kesildiğinde sıcaklık düşmeye başlar, kaynak havuzu katılaşır ve kaynak külçesi (4) oluşmaktadır [36,37].

3.1. Direnç Nokta Kaynağının Tanımı ve Çalışma Prensibi

Punta kaynak işleminde, (2 veya 3) adet üst üste veya istiflenmiş damgalı sac, elektrik rezistansının ürettiği ısı sonucu birbirine kaynak yapılır. Bu, iki elektrot arasındaki

sıkıştırma altında bir arada tutulan iş parçaları tarafından sağlanır. Punta kaynağı manuel olarak, robotik olarak veya özel bir punta kaynak makinesi tarafından yapılabilir [38,39]. Kaynak akımı, elektrot kuvveti ve kaynak süresi otomatik olarak kontrol edilerek yüksek üretim hızlarında aynı özelliğe sahip eşit punta kaynakları elde edilebilir [40,41]. RSW'nin şematik gösterimi Şekil 3.3'de gösterilmiştir.



Şekil 3.3 : RSW'nin şematik gösterimi [32].

Teknik olarak elektrotlara uygulanan kuvvetler aracılığıyla sağlanan sürekliliktir. Bu nedenle, sınırlı bir metal hacmini erimiş duruma yükseltmek için yeterli ısı üretilir. Bu erimiş metal daha sonra parçaları bir arada tutmaya yetecek güce ulaşana kadar sıkıştırma altında soğumaya bırakılır. Kaynak akımı ve elektrot kuvveti, bir külçe oluşturacak şekilde olmalı, ancak erimiş metalin kaynak bölgesinden dışarı atılmasını sağlayacak kadar yüksek olmamalıdır. Kaynak akımının süresi, elektrot uç ucunun aşırı ısınmasını önlemek için yeterince kısa olmalıdır. RSW işlemleri için gereken ısı, iş parçasının malzemeden geçen elektrik akımına gösterdiği dirençle yaratılır. İş parçasındaki elektrik akımı yolunun kısa olması ve kaynak süresinin sınırlı olması nedeniyle, gerekli kaynak ısını geliştirme için nispeten yüksek akım yoğunluğu gerekir.

“ $Q = I^2 \times R \times t$ ” formülüne göre üretilen ısı miktarı şu üç faktöre bağlıdır:

- Kaynak akımı
- İletkenin direnci
- Akımın süresi [32].

Isı formülündeki direnç (R), iş parçaları arasındaki arayüzdeki temas direnci üzerindeki etkisi yoluyla kaynak basıncı tarafından etkili bir şekilde kontrol edilir.

3.2. Direnç Nokta Kaynağı Parametreleri

Sac yüzeyler ve elektrotların şekli ve boyutu, metalin kalınlığı ve bağlantı yerinin uyumu da kaynak kalitesini etkiler. Kaynak akımı, kaynak süresi ve elektrot kuvvetinden oluşan üç ana kaynak karakteristiğinin kontrol edilebilmesi, bu konuda detaylı bilgi ve deneysel testlerin yapılmasını gerektirmektedir [30].

Kaynak makinelerinde kaynak değişkenlerini takip etmek için elektronik kontrol ünitesi kullanılmaktadır. İstenilen kaynak külçesi/çekirdek çapı ancak kaynak akımı yoğunluğunun kaynak süresine göre uygun şekilde ayarlanmasıyla elde edilebilir. Kaynak süresi kısa tutulduğunda külçe çapı azalır. Aksine, uzun süre tutulduğunda eriyen metal miktarı artar ve erimiş metal dışarı fırlar ve bunun sonucunda kaynak bağlantısının mukavemeti azalır [32].

3.2.1. Kaynak akımının etkisi

Teknik olarak kaynak akımı veya akım yoğunluğu ısı üretimiyle ilgilidir. Hem alternatif akım yoğunluğu "AC" hem de "DC"nin doğru akım yoğunluğu, kaynak işlemlerinden, daha sonra füzyon için gerekli ısıyı üreten yüksek akım yoğunluklarını sağlamak için kullanılabilir [30]. DC sistemi, AHSS kaynağı yaparken elektrik taleplerini azaltabilir. DC, RSW'yi daha verimli hale getirir [33]. RSW'nin mevcut profilleri yukarı eğimler, aşağı eğimler ve darbelerin eklenmesiyle değiştirilebilir. Tawade ve ark. [34] yukarı eğimin eklenmesinin AHSS için kaynak lobundaki pencerenin arttırılmasına yardımcı olabileceğini iddia etmektedir.

Aslanlar'ın [32] ileri sürdüğü gibi, RSW'deki kaynak akımı iki şey tarafından kontrol edilir: birincisi, transformatör kademe anahtarının ayarı mevcut maksimum akım yoğunluğunu belirler; ikincisi, akım kontrolünün yüzdesi, kaynak yapmak için kullanılacak mevcut akımın yüzdesini belirler. Düşük kaynak akımı yüzdesi normalde önerilmez çünkü bu, kaynağın kalitesini bozabilir. Kaynak akımı mümkün olduğu kadar düşük tutulmalıdır. Kullanılacak kaynak akımı belirlenirken, saclar arasında kaynak sıçraması oluşana kadar akım yoğunluğu kademeli olarak artırılır. Bu, doğru kaynak akımına ulaşıldığını gösterir [32].

3.2.2. Kaynak süresinin etkisi

Temel olarak direnç nokta kaynağı şu şekilde tanımlanan dört süreden oluşur; sıkma veya sıkıştırma, kaynaklama, tutma ve son serbest bırakma. Kaynak süresi malzeme cinsine, kaynak kalitesine ve verimliliğe göre belirlenmelidir. Sıkıştırma süreleri boyunca, pozisyona yerleştirilen metal levhalar elektrotlarla sıkıştırılır. Elektrot basıncı istenilen seviyeye ulaştığında akım uygulanarak kaynak işlemine devam edilir. Bu süre zarfında erime ve birleşme meydana gelir [33]. Sıkma süresi, elektrot kuvvetinin iş parçasına ilk uygulanması ile kaynak akımının ilk uygulanması arasındaki zaman aralığıdır. Elektrot basıncı istenen seviyeye ulaşana kadar kaynak akımını geciktirmek önemlidir. Daha sonra kaynak süresi tüm zamanlama fonksiyonları gibi hat voltajı döngüleri halinde ölçülür ve ayarlanır. Uzun süre tutulduğunda erimiş metal miktarı artar ve erimiş metal dışarı fırlar, metal bileşenlerin yüzeylerinde mikroskobik ölçekte bir dizi tepe ve çukur oluşur ve malzemenin kristal yapısı değişir. Elektrotlar hemen çıkarıldığında ısı dağılır ve temas yüzeyi karanlık görünür. Kaynak işleminden hemen sonra ise kaynağın soğuması için elektrotların sac üzerine uygulanması gerekir. Kaynak parçasının, kaynaklı parçalar serbest bırakılmadan önce katılaşmasına izin vermek için elektrot tutma süresi gerekli olacaktır, ancak çok uzun olmamalıdır çünkü bu, kaynak noktasındaki ısının elektroda yayılmasına ve onu ısıtmasına neden olabilir. Örneğin, galvanizli karbon çeliğinin kaynağı için daha uzun bir elektrot tutma süresi tavsiye edilir [32].

3.2.3. Elektrot kuvvetinin etkisi

Bir elektrot basınç yükü tamamen etki edebilir; Bir malzemenin temas direncini etkiler. Daha yüksek elektrot kuvveti, daha iyi arayüz teması ve azaltılmış dirençle sonuçlanır. Bu, kaynak sırasında daha düşük ısı üretilmesine neden olabilir ve bu durumun, kaynak süresinin artmasıyla veya daha yüksek akım girişleriyle telafi edilmesi gerekir [34]. Ayrıca aşırı elektrot kuvveti iş parçasında aşırı elektrot dalma derinliğine neden olabilir [30]. Temel olarak elektrot kuvvetinin amacı, birleştirilecek metal levhaları sınırlandırmaktır. Bu, büyük bir elektrot kuvveti gerektirir çünkü aksi takdirde kaynak kalitesi yeterince iyi olmayacaktır. Ayrıca elektrot kuvveti arttığında ısı enerjisi azalacaktır. Bu, daha yüksek elektrot kuvvetinin daha yüksek bir kaynak akımı gerektirdiği anlamına gelir. Kaynak akımı çok yükseldiğinde elektrotlar ve levhalar

arasında sıçrama meydana gelecektir. Ancak bu, elektrotların tabakayı sıkıştırmasına neden olma potansiyeline sahiptir. Elektrot kuvveti için yeterli hedef değer (700 kg/cm^2)'dir [35]. Ancak sorunlardan biri kaynak sırasında temas yüzeyinin boyutunun artmasıdır. Aynı koşulları korumak için elektrot kuvvetinin kademeli olarak artırılması gerekir. Elektrotların "mantarlı" olmasıyla elektrot kuvvetini aynı oranda değiştirmek oldukça zor olduğundan, genellikle ortalama bir değer seçilir [36].

3.2.4. Elektrot bileşiminin ve elektrot şeklinin etkisi

RSW elektrotlarının teknik olarak aktif fonksiyonları, iş parçasına kuvvet uygulamak, gerekli akım yoğunluklarını sağlamak ve kaynak sonrası soğutmayı kolaylaştırmaktır. Kesik elektrotlar, sınırlı kontak ucu büyümesi nedeniyle endüstriyel uygulamalarda yaygın olarak kullanılır. Ancak kesik elektrotların hizalanması sırasında kaynak kalitesi yanlış hizalamadan ciddi şekilde etkilenebileceğinden dikkatli olunmalıdır [30]. RSW'deki en büyük sorun elektrot ömrünün kısa olmasıdır. Bu sadece sık sık değiştirilme veya taşıma ihtiyacı nedeniyle değil, aynı zamanda üretkenliği nasıl azalttığıyla da ilgilidir. DP600 çeliğinin kaynağı için (1200) kaynaklarında herhangi bir külçe oluşmadığını göstermiştir. Elektrot aşınması, elektrotun servis ömrünü etkileyen ana faktördür. Kontrol edilmesi zordur ve kaynak kalitesini ciddi şekilde etkilemektedir.

AHSS'nin kaynaklanması, elektrotun kaplanmamış çeliklere göre daha hızlı aşınmasına neden olur. Elektrot aşınmasıyla ilgili araştırmaların bir kısmı esas olarak elektrot servis ömrü ve elektrot arıza formu üzerinde yoğunlaşmıştır [35]. Belirli sayıda punta kaynağı yapıldıktan sonra elektrot aşınmasından dolayı külçe oluşmaz ve elektrotun değiştirilmesi veya topraklanması gerekir. Ancak aşınma sonrası elektrot ucu morfolojisi kaynak kalitesi üzerinde önemli bir etkiye sahiptir [36]. Elektrotların iş parçasına temas eden yüzeyinde lokal olarak ulaşılan yüksek sıcaklıklar ve birleştirme işlemleri sırasında elektrotlara belirli bir basınç uygulanması nedeniyle elektrot uç yüzeylerinde deformasyonun oluşması beklenir. Bu amaçla RSW elektrotlarının ömrünün uzatılmasında elektro-kıvılcım kaplama işlemleri uygulanabilmektedir.

3.2.5. Metal bileşiminin ve elektriksel özelliklerin etkisi

Metalin elektriksel direncinin kaynak sırasında direnç ısınmasını doğrudan etkilediğini göstermektedir [8]. Örneğin gümüş ve bakır gibi iletkenliği yüksek metallerde, yüksek kaynak akımı altında bile çok az ısı oluşur. Kaynak külçesinde üretilen az miktardaki ısı hızla çevredeki iş parçasına ve genellikle su soğutmalı elektroda iletilir. Spesifik ısı, erime sıcaklığı, füzyonun gizli ısı ve metalin termal iletkenliği, kimyasal bileşimi tarafından belirlenir. Bu metal özellikleri, metali eritmek ve kaynak yapmak için gereken ısı miktarıyla ilgilidir. Ticari metallerin çoğunun punta kaynağı özellikleri farklı olmasına rağmen, çoğu ticari metal için füzyon sıcaklığını yükseltmek için gereken ısı miktarları hemen hemen aynıdır. Alüminyumun elektriksel ve termal iletkenlikleri paslanmaz çeliğinkinden yaklaşık on kat daha fazladır. Bu nedenle alüminyumda elektrotlara ve çevredeki metale olan ısı kaybı daha fazladır. Bu nedenle alüminyum alaşımı için kaynak akım yoğunluğunun paslanmaz çeliklere göre daha yüksek seçilmesi gerekmektedir [8].

3.2.6. Metallerin yüzey özelliklerinin etkileri

RSW boyunca birçok kontrol ve çevresel parametre bağlantının kalitesini belirler; örneğin; akım yoğunluğu, kaynak süresi, elektrotların baskı kuvveti, yüzey durumu, elektrot ucunun aşınma oranı ve kaynak yapılacak sacın kalınlığı (AWS 2000) [37]. Myers ve Montgomery 1995, Montgomery 2001 [38,39] tarafından süreçlerin optimal parametrelerini elde etmek için yüzey özellikleri kullanılmıştır.

Yüzeydeki oksitler, kir, yağ ve diğer yabancı maddeler gibi yüzey koşulları temas direncini ve dolayısıyla RSW proseslerinde ısı oluşumunu etkiler. Örneğin, tabakanın yüzeyindeki pullanma elektrot yüzlerine de gömülerek elektrotun hızlı aşınmasına neden olabilir. İş parçası yüzeyindeki yağ ve gres, elektrotun bozulmasına katkıda bulunarak büyük ölçüde katkıda bulunur. Sonuç olarak, yüzey yabancı maddelerden temizlendiğinde en düzgün ve istenilen kaynak özellikleri elde edilir.

3.2.7. Metal kalınlığının etkileri

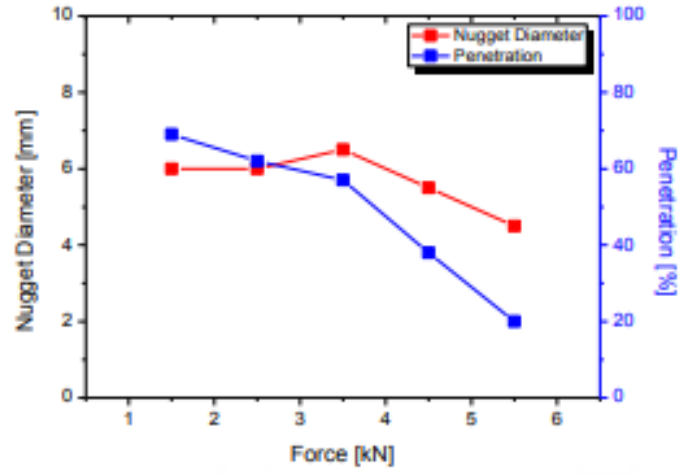
Fark edilebilir bir şekilde, RSW aynı metalin eşit olmayan levha kalınlığını, elektriksel ve termal iletkenliklerinde, elektriksel direncinde ve termal katsayısında veya bunların bir kombinasyonunda önemli bir fark olan iki metalin kalınlığını topladığında termal

denge (ısı dengesi) bir sorun oluşturabilir. Elektrot konfigürasyonu ve bileşimi, dengesiz ısıtma dağılımı problemini aşmak için kullanılabilir. Daha küçük uç ucuna sahip elektrot, füzyon elde etmek için genellikle yüksek iletkenliğe sahip metaller ve alaşım üzerinde, düşük iletkenliğe sahip metaller ve alaşım üzerindeki elektrottan daha çok kullanılır. Elektrota ısı kaybının önlenmesi için iletkenliği yüksek alaşım yerine daha yüksek dirençli elektrot malzemesi seçilir. Yüksek iletkenliğe sahip alaşımın kalınlığının arttırılması, eşit olmayan sac kalınlıkları için dengesiz ısıtma için de kullanılabilir. Daha kalın tabaka daha yüksek direnç (düşük iletkenlik) sahiptir ve külçe daha derine nüfuz etme eğilimindedir. Isı dengesinin, ya daha kalın levhadaki akım yoğunluğunun azaltılmasıyla ya da daha ince levhadan ısı kaybının azaltılmasıyla ya da her ikisinin sırasıyla ve toplu olarak kombinasyonu ile iyileştirildiği ortadadır. Elektrot uç uç çapları eşit olmayan kalınlığa uyum sağlayacak şekilde seçilmeli ve seçilmelidir. Büyük çaplı düz elektrotun bir tabakaya uygulanması, kaynak külçe geometrisinin boyutu ve şekli açısından kaçınılmaz olanı etkileyecektir. Yassı elektrot daha kalın metale temas ettiğinde kalınlık oranı arttıkça daha büyük bir dengesizlik meydana gelir ve bu da istenmeyen kaynak durumuna neden olur. Daha yüksek akım yoğunluğu ve elektrot kuvveti gerekli olmasına rağmen, büyük düz elektrot daha ince kesite temas ettiğinde daha iyi kaynak koşulu sağlanır.

3.2.8. Kaynak geometrisi

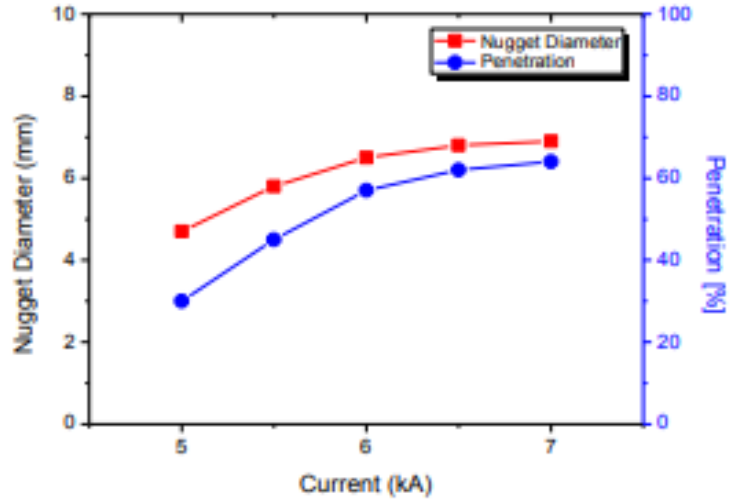
Sacın ara yüzeyindeki kaynak külçesinin boyuna yöndeki genişliği olarak tanımlanabilen kaynak külçesi veya FZ boyutu D, punta kaynaklarının kalitesini belirleyen en önemli unsur olarak kabul edilir [38,39]. Bağlantının toplam bağlanma bölgesini kontrol eden füzyon alanı boyutu, kaynak elemanları tarafından genellikle elektrot kuvveti, kaynak süresi ve kaynak akımı tarafından kontrol edilen ısı girdisi tarafından yönetilir. Penetrasyon derinliği, FZ'deki kalınlık yönündeki boşluk boyunca erimiş alanın genişliği olarak tanımlanabilir. Kaynak külçesindeki boşluk oluşumunun, dışarı çıkma ve katılaşma büzülmesi olmak üzere iki kaynağı vardır [40]. Patlama, katılaşmanın ardından kaynak külçesini dolduracak malzeme eksikliğine yol açar. Elektrot kuvveti soğutma sonrasında boşluk oluşumunu belirler. Elektrot kuvveti yeterince yüksekse soğutma sonrasında boşluk veya gözenek kalmayacaktır. Külçe büyümesi üzerindeki sıkıştırma yükünün etkisi, 1,5 kN'den 5,5 kN'ye kadar olan yükleme aralığında gözlemlenmiştir.

Şekil 3.4'de yükleme büyüklüğüne bağlı olarak külçe çapı ve penetrasyon oranı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Kenetleme yükünün artmasının iki çelişkili etkisi vardır: ısıtılmış temas bölgesinin arttırılması ve akım yoğunluğunun yayılması. Külçe çapının en büyük değeri 3,5 kN sıkma yükünde belirtilmiştir. Aynı şekilde (Şekil 3.4), 3,5 kN'lık kenetleme yükünde külçe penetrasyon hızının bir bükülme noktası boyunca azalma eğiliminde olduğu bulunmuştur. Akım yoğunluğunun büyüklüğü, dikey yönde külçe nüfuzunun hâkim unsuru olabilir. Erime alanı ise elektrotun soğutulması ile sac kalınlığının içine doğru yönetilir [41].



Şekil 3.4 : Sıkıştırma yükünün külçe oluşumu üzerindeki etkisi [42].

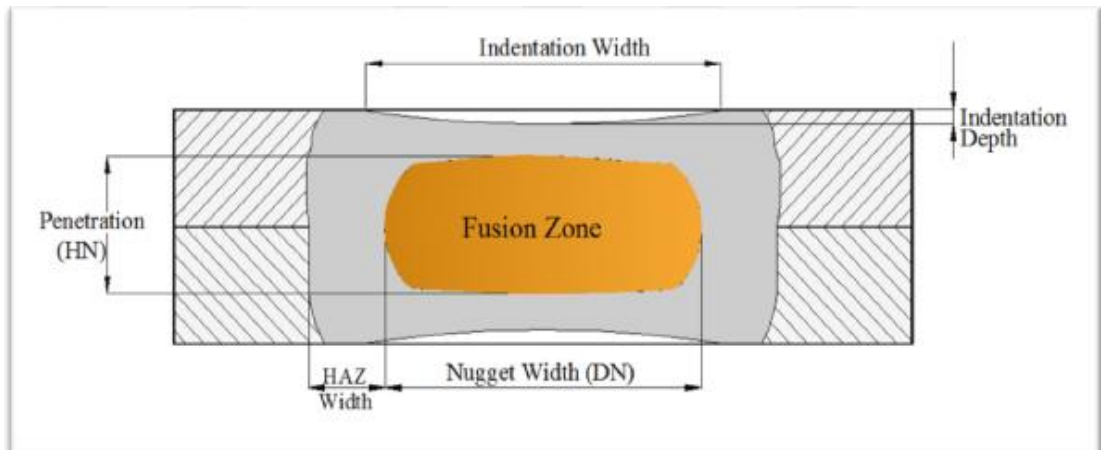
Giriş akımının külçe büyümesi üzerindeki etkisi 5kA ila 7 kA arasındaki akım aralığında gözlemlenmiştir. Şekil 3.5'de külçe çapı ile giriş akımına ilişkin penetrasyon hızı arasındaki ilişki gösterilmektedir. Giriş akımının arttırılması, hem külçe çapında hem de penetrasyon oranında monoton bir artış sağlar. Ancak temas bölgesinin genişlemesinin ve akım yoğunluğunun azalmasının nedeni çelik sacın yumuşamasıdır. Böylece, giriş akımının 6kA'dan fazla olduğu alanda külçe boyutu artışı doyuma ulaşır [42].



Şekil 3.5 : Giriş akımının külçe oluşumu üzerindeki etkisi [43].

3.2.9. Nokta direnç kaynağında penetrasyon ve elektrot dalma derinliği

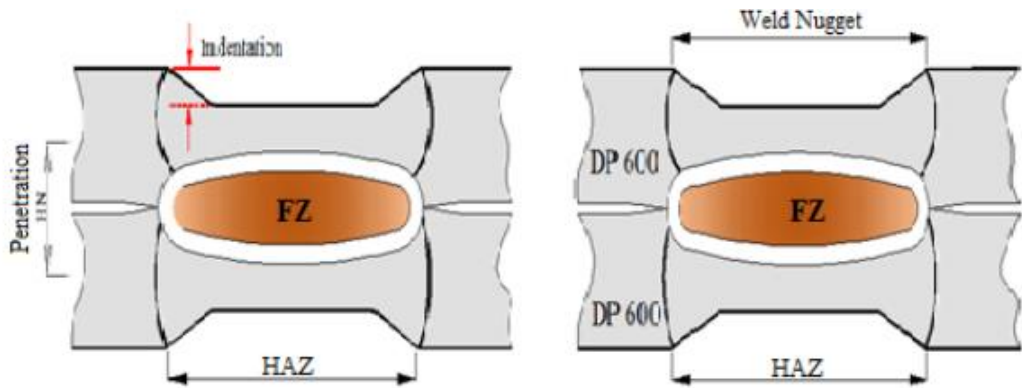
Penetrasyon derinliği, kalınlık yönündeki erimiş alanın genişliği olarak tanımlanabilir. Penetrasyon, kaynak prosesi boyunca kalınlığın erime derecesini tanımladığı kaynak kalitesinin diğer tarafı olarak kabul edilir. Küçük nüfuziyet yetersiz ısıtmaya işaret edebilir ve soğuk kaynağa işaret edebilir. Genel olarak büyük bir penetrasyon arzu edilir. Bununla birlikte, ısıtma miktarı penetrasyonu belirlediğinden, büyük penetrasyon malzemelerin yumuşamasına ve elektrotlar tarafından olası büyük elektrot dalma derinliğine neden olur. Genel olarak, nüfuz etme gereksinimleri gevşektir, ancak büyük bir deformasyon oluşturmayacaksa, büyük nüfuz etme kabul edilecektir [22].



Şekil 3.6: RSW'de penetrasyon [44,45].

Daha önce de belirttiğimiz gibi kaynak kabiliyetinin en önemli faktörü elektrotun ömrüdür, yani belirlenen sınırlar dahilinde oluşturulabilecek kaynak sayısı anlamına gelir. Darbe numunesinin boyutu ve çekirdek boyutunun çekme kayma mukavemeti ve mikro sertlik üzerindeki etkisi, ilgili diyagram Şekil 3.6'da elde edilen sonuçların yerleştirilmesi ve kullanılmasıyla araştırılmıştır [46,47]. Çekirdeğin çapı, d_n veya nükleerin yüksekliği, h_n , kaynak çekirdeğinin bağlantının çekme kesme mukavemeti üzerindeki etkisini basitleştirmek için yeterli değildir. Böylece Çekirdek oranı, h_n/d_n bu nedenle ayarlanabilmektedir [48,49].

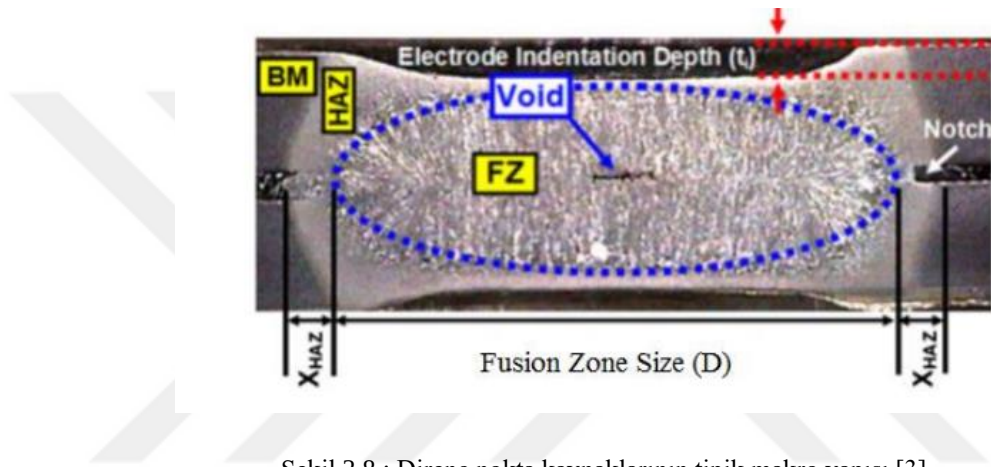
Nokta kaynaklarının mekanik özelliklerini oluşturan ve etkileyen elektrot elektrot dalma derinliğinin (bkz. Şekil 3.7), elektrot/tabaka arayüzünün sıcaklığına ve elektrot basıncına bağlıdır. Isı girdisi arttığında elektrot/tabaka arayüzünün sıcaklığı artar, bu da elektrot basıncı altında levha yüzeyinde meydana gelebilecek plastik deformasyonun derecesini artırır [50]. Elektrot dalma derinliği derinliğini en az seviyede tutabilmek için kaynak parametrelerinin ve elektrot geometrisinin kontrol edilmesi gerekmektedir. FZ ve HAZ'ın sertliği ve malzeme özellikleri: kaynak termal döngüsü etkileşimi, BM'nin başlangıç mikro yapısı ve kimyasal bileşim, FZ ve HAZ'ın sertliğini ve malzeme özelliklerini kontrol eder. HAZ boyutu: FZ'den çevreye ısı transferi HAZ'ın boyutunu belirler. Birçok araştırmacı HAZ boyutunun nokta kaynaklı bağlantıların sünekliği üzerinde etki yapabileceğinden bahsetmiştir [51]. BM'nin ön mikro yapısı, kimyasal bileşimi ve kaynak termal döngüsünün etkileşimi, FZ ve HAZ'ın sertliğini ve malzeme özelliklerini kontrol eder.



Şekil 3.7 : RSW'deki elektrot dalma derinliği [52].

3.3. Mikroyapı

Direnç nokta kaynağı sayesinde kaynak metalinin ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) metalurjik ve mekanik özelliklerinde birçok değişiklik meydana gelir. Bu değişikliklerin incelenmesi kaynaklı bağlantıların mukavemeti, güvenliği ve korunması açısından önemlidir [53]. Metalin kaynak sonrası mikro yapısı, metalin kaynak işlemi öncesindeki mikro yapısından farklıdır ve bu, malzemelerin şekillendirilebilirliğini ve mukavemetini belirlemek için kilit noktadır. Kaynak sonrasında üç alan belirlenir ve Şekil 3.8'de [54] gösterildiği gibi orijinal mikro yapı bozulur.



Şekil 3.8 : Direnç nokta kaynaklarının tipik makro yapısı [3].

- Kaynak parçası,
- Isıdan etkilenen bölge (HAZ),
- Etkilenmeyen ana malzeme. Kaynak parçası, kaynak yoluyla eritilen malzemelerden oluşur. Kaynak işleminden sonra malzeme katılaşacak ve daha sonra faz dönüşümlerine uğrayacaktır.

Malzemenin kimyasal bileşimine göre iki yol tanımlanabilir [55,56]:

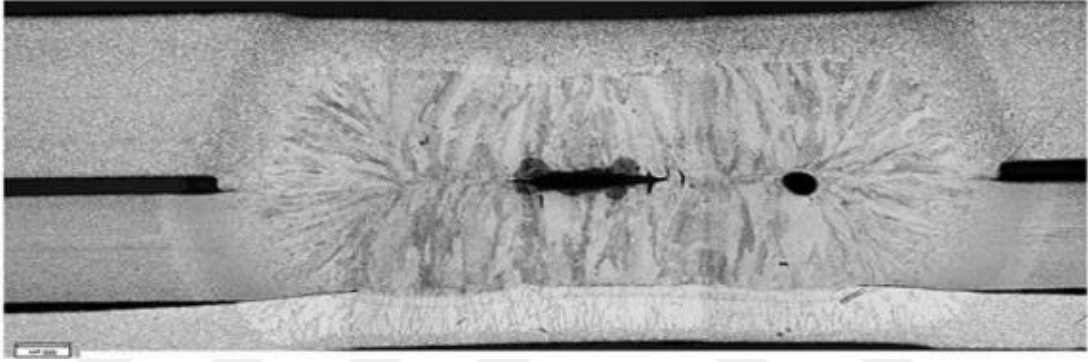
- Sıvı, delta ferrit, östenit, martensit ve/veya beynit,
- Sıvı, östenit, martensit ve/veya beynit.

Kimyasal bileşim ve soğuma hızı, ortaya çıkan mikroyapısal bileşimin beynitik mi, martensitik mi yoksa her ikisinin karışımı mı olacağını belirler. Düşük soğutma oranlarında ve/veya daha düşük alaşımlama seviyelerinde, elde edilen mikro yapı tipik olarak beynitik olacaktır. Artan alaşımlama seviyelerinde (alaşım endüstrisinde karbon

ana element olarak kabul edildiğinde) ve yeterince yüksek soğutma hızlarında, ortaya çıkan mikro yapı çoğunlukla martensitik olacaktır.

Kaynak parçasının soğuduktan sonra bir miktar ayrılmış ostenit içermesi muhtemeldir (özellikle TRIP çeliklerinde, sonuçta ayrılmış ostenit içermesine izin verilmiştir) [57].

Kaynaktan sonra kaynak parçasının mikroyapısal bileşimine rağmen, kaynağın önemli bir etkisi, taneciklerin ve boyutun yönelimidir ve esas olarak katılaşmanın yörüngesi ve Şekil 3.9'da gösterildiği gibi soğutma yoluyla sıcaklık eğimleri tarafından belirlenir. Merkez hattındaki boşlukların katılaşma ve soğuma nedeniyle oluşan büzülmeden kaynaklandığına dikkat edilmelidir.



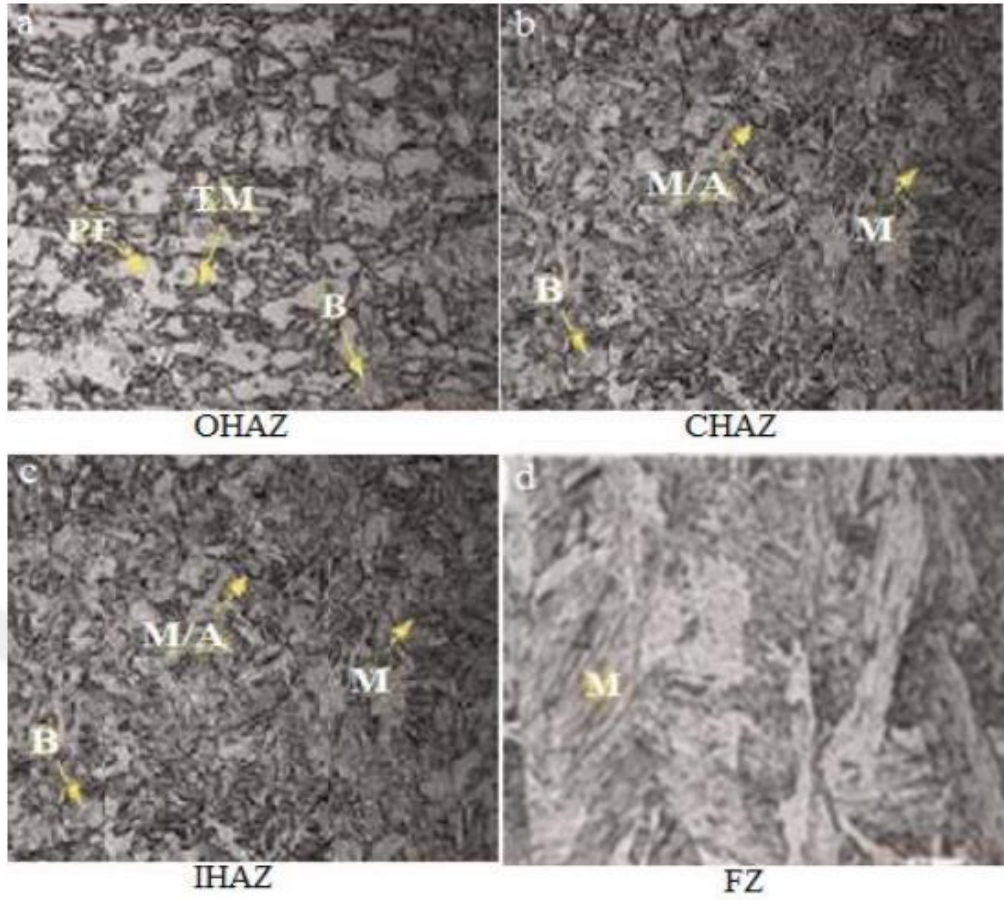
Şekil 3.9 : 3 tabakalı direnç nokta kaynak bağlantısının mikrografı [58].

Şekil 3.10, FZ ve HAZ alanlarındaki BM'nin mikro yapılarına dair hiçbir kanıt bulunmadığını açıklığa kavuşturmaktadır. FZ'nin mikroyapıları HAZ'ların mikroyapısından daha az heterojendir. Çeliklerin BM mikroyapıları, RSW işlemi yoluyla HAZ bağlantılarında önemli mikroyapısal değişiklikler yaşamaktadır.

ITAB'ın mikroyapılarını analiz etmek amacıyla ısıdan etkilenen dış bölge (OHAZ), ısıdan etkilenen merkez bölge (CHAZ) ve ısıdan etkilenen iç bölge (HAZ) olmak üzere üçe ayrılır. Şekil 3.10'da gösterildiği gibi OHAZ mikroyapıları ferrit matris içinde temperlenmiş beynit ve martensit içerir. OHAZ'lerdeki beynit oluşumu, dirençli nokta kaynak işlemi yoluyla kısmi yeniden östenitleşmenin varlığına bağlanabilir. OHAZ'lerdeki sıcaklığın A_1 'i aştığı varsayılmaktadır. IHAZ ve CHAZ'ın mikroyapıları martensit-östenit (M-A), beynit ve martensit bileşenlerinden (küçük karanlık fazlar) veya ayrılmış ostenitten oluşur. Bu mikro yapılar, ferritin ısıtma sırasında ostenite dönüştüğü sıcaklık olan A_3 üzerinde tam yeniden östenizasyonun IHAZ'lar ve CHAZ'lar içinde ortaya çıktığını ifade eder. Punta kaynak işlemi (Şekil 3.10 b ve c) bileşenleri yoluyla M-

A'nın oluşumu, beynite dönüşüm yoluyla karbonun bölünmesine ve karbonla zenginleştirilmiş ostenitin sonradan dönüşümüne atfedilebilir [59]. Ayrıca CHAZ'larda beynit ve martenzit fazları daha kabadır ve bu fazlar için hacim oranı OHAZ'lara göre daha yüksektir.

Bunun nedeni CHAZ'daki en yüksek sıcaklıkların OHAZ'dakinden daha yüksek olmasıdır. DP600 tarafındaki CHAZ, Şekil 3.10'da gösterildiği gibi oldukça kaba önceki östenit tanelerini (PAG'ler) içerir. Bunun nedeni DP600 tarafındaki sıcaklığın yüksek olması olabilir. Üstelik, CHAZ'lardaki en yüksek sıcaklık IHAZ'dan daha düşük olduğundan, PAG'ın boyutu arttıkça IHAZ'daki beynitik ve martensitik yapılar kabalaşır. CHAZ'da olduğu gibi, DP600'deki IHAZ, DP600'ün IHAZ'ında ulaşılan en yüksek sıcaklığa kadar daha kaba PAG'ler içerir. Bunun nedeni DP600 çeliğinin daha yüksek termal faktörüdür. FZ mikro yapısı, direnç nokta kaynağı işlemi yoluyla eritilen ve daha sonra Şekil 3.9 d'de açıklandığı gibi füzyon sınırından merkeze doğru sütunlu ve yönlü katılma nedeniyle yaklaşık tam sütunlu kaba çita martenzitinden oluşan katılma bir döküm yapısını gösterir. FZ'de Martenzit oluşumu, kısa bir kaynak çevrimine ek olarak su soğutmalı bakır elektrotların ortaya çıkması ve bunların söndürme etkisi nedeniyle dirençli nokta kaynağı işleminin doğası gereği yüksek soğutma oranına atfedilir. Ayrıca DP çelikleri, benzer çeliklerde FZ'de kaba martensit mikroyapı oluşumunu kolaylaştıran nispeten daha yüksek miktarlarda karbon alaşımı faktörleri içermektedir [60].



Şekil 3.10 : DP600 çelik bağlantının ayırt edici mikro yapısı [59].

HAZ'ların boyutları daraltılır ve kaynak akımı azaltılır. Kaynak akımı arttırıldığında DP1000 ve DP600 tarafındaki HAZ genişlikleri yaklaşık %43 oranında azalmıştır. Daha düşük kaynak akımına sahip, birleştirmeler için FZ'nin mikro yapıları genellikle sütunlu yapıya sahip kaba martenzitten oluşur. 10 kA'e kadar olan kaynak akımı açısından FZ'deki sütunlu martenzit parçacıkları kaynak akımında artış yaşamıştır. Kaynak akımı 10 kA olduğunda sütunlu martensit taneleri neredeyse eşit tanelere dönüşmektedir.

3.4. Direnç Nokta Kaynağı Bağlantı Noktalarının Mekanik Özellikleri

Otomobil yapı endüstrisinde DP çelik saclar için en çok kullanılan birleştirme işlemi direnç nokta kaynağıdır. Direnç nokta kaynaklı bağlantılarda meydana gelen mikroyapısal değişiklikler büyük ölçüde kaynak elemanlarına, ana metal (BM) kimyasına ve BM'nin birincil mikro yapısına bağlıdır. Direnç nokta kaynaklarının mukavemet ve arıza özellikleri, sac kalınlığının ve kaynağın kablo demetlerinin, külçe boyutunun (NS) ve ısıdan etkilenen bölgenin (HAZ) fonksiyonudur [60,61]. Direnç nokta kaynağının

kalitesi ve mekanik davranışı, aracın çarpmaya karşı dayanıklılığını ve dayanıklılığını doğrudan etkileyen bitişik HAZ'a ve kaynak külçesinde meydana gelen mikroyapısal değişikliklere bağlıdır [62].

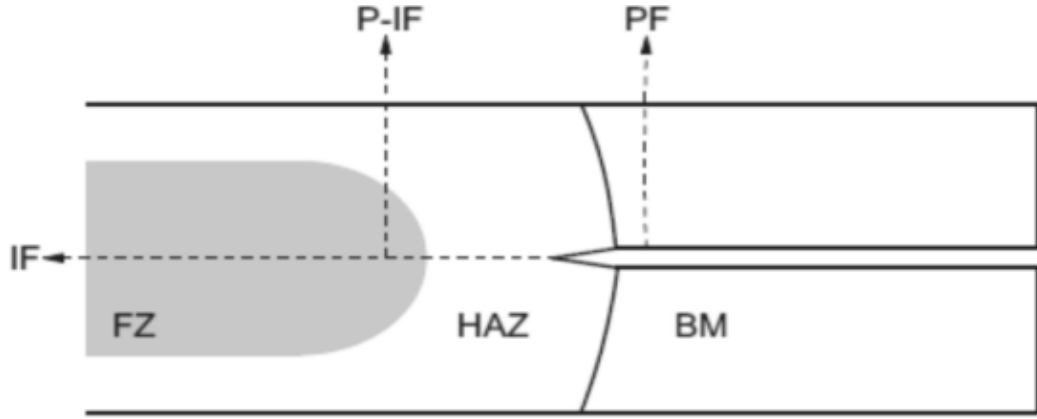
3.4.1. Çekme yükü taşıma kapasitesi

Kaynakların çekme kesme mukavemeti, BM çekme mukavemeti arttığında orantılı olarak artar. Bunun yerine taban artırıldığında çapraz gerilim artar. Servis yoluyla, araba gövde yapılarındaki nokta kaynakların hem çekme yükünün bağıl hareketi veya dönmesi nedeniyle kesme yüküne hem de komşu levhalar arasında uygulanan çıkarma kuvvetleri nedeniyle komşu levhalara normal yönde uygulanan kesme kuvvetlerine maruz kalabileceği fark edilmiştir. Nokta kaynağının mekanik davranışını değerlendirmek için en sık kullanılan testler, çapraz gerilim (CT) ve çekme kesmesidir (TS) [63].

3.4.2. Çekmede Kesme Yetmezliği Davranışı

Peterson ve ark. [64], kaynak bağlantılarının mekanik özelliklerini, füzyon eksikliği, ara yüzey kırılması, kalınlık kırılması ve düğmenin çekilmesi şeklindeki kırılma modlarına karşı incelemiştir. Joaquin ve ark., yorulma testlerinden ve çekme kayma statüğünden kaynaklanan ara yüzey kırılmasının ana nedenlerinden birinin büzülme boşlukları olduğunu belirtmiştir. Milititsky ve ark. [65] DP600 numunelerinin çekme kesme testlerini gerçekleştirmişdiler ve algılanan katılaşma çatlakları ve büzülmelerini gözlemlemişlerdir.

Şekil 3.11, Çekme arızası (PF), arayüz arızası (IF) ve Kısmi arayüz arızası (P-IF) gibi arıza modu türlerinin şematik açıklamasını sunmaktadır. IF, kaynağın merkez çizgisinin yanına ve iki tabaka arasındaki çentikten rehinlere yayılır. Oysa genellikle HAZ veya BM'de ortaya çıkan PF arızası için, kaynak külçesinin bir levhadan tamamen çekilmesiyle minimum sertlik konumuna bağlıdır. P-IF'nin ön arıza konumu IF ile aynıdır. Test yükü arttıkça sac kalınlığı yönüne doğru ilerlemektedir.

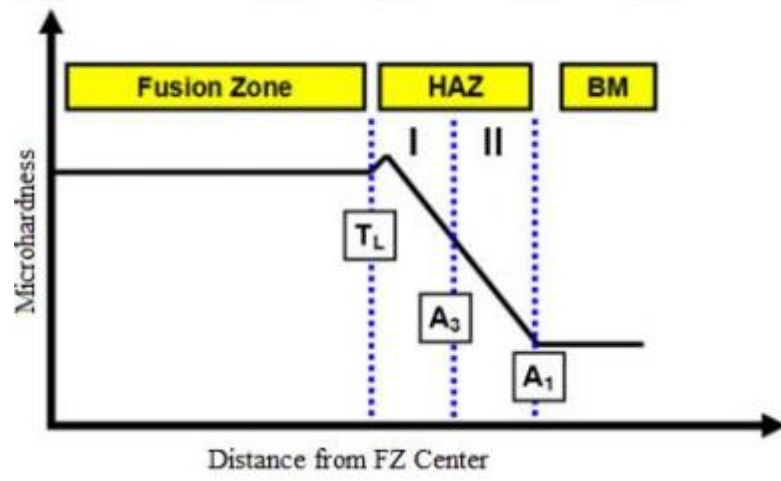


Şekil 3.11 : Üç farklı arıza modunun diyagram açıklaması [66].

Direnç nokta kaynağı çeliğinin etkisiz yaklaşımları, düğmenin çekilmesi, kısmi çekilmesi ve çekme düğmesinin en iyi olduğu ve mod aracılığıyla daha fazla enerjinin devreye girdiği ilişkisel kırılmadır [67]. Zhang ve diğerleri. [68], etkisiz yaklaşımın temel olarak füzyon alanının boyutuna dayandığını ve bu başarının, füzyon alanının boyutu arttıkça ve en az sayıda nokta tespitini artırdıkça çekme yaklaşımı altında ortaya çıkacağının öngörülebilir olduğunu öne sürmektedir.

3.4.3. Sertlik Profili

Punta kaynaklarının sertlik özellikleri, mekanik özelliklerinde ve arıza modlarında önemli bir rol oynamaktadır. Şekil 3.12. Katı hal aşaması değişikliklerini sıklıkla uygulayan ancak erime ve doğal BM olmayan FZ'nin yanı sıra katılaşma ve erime yaşayan FZ'ye (HAZ) uygun üç farklı alanı temsil eden normal otomotiv çelikleri üzerinde oluşturulan direnç nokta kaynaklarının sertlik profillerinin grafik gösterimini açıklamaktadır [68], Direnç nokta kaynağı termal çevrimlerinin teşvik ettiği hızlı ısıtma ve soğutma, mikro yapıyı önemli ölçüde değiştirerek sertlik profilinde önemli farklılıklara neden olabilir.



Şekil 3.12 : Direnç nokta kaynaklarının tanımlayıcı sertlik profilinin diyagramı [3].

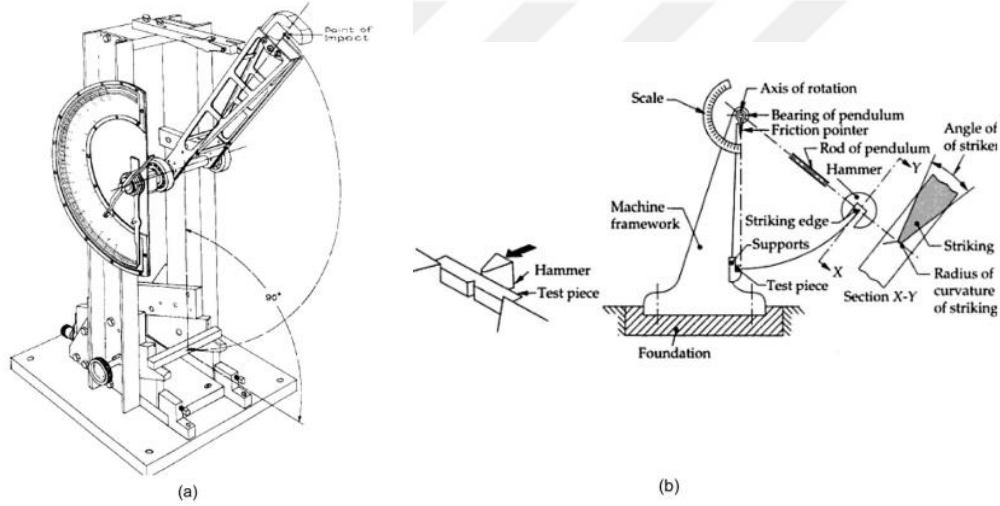
BÖLÜM 4. ÇENTİK DARBE TESTİ

Malzemenin dinamik yüklemeye tepkisini ölçmek için darbe testleri yapılır. Sarkaç makinesi ve düşme kulesi en yaygın iki laboratuvar testidir. Tipik olarak, darbe enerjisinin veya tek bir numuneye harcanan enerjinin tek bir değeri şeklinde sonuçlar üretilir. Ancak bu sınırlı bilgiyle malzemenin dinamik davranışını açıklamak zordur. Bu nedenle, dinamik test sırasında herhangi bir zamanda vurucunun darbe kuvvetleri, darbe hızları, yer değiştirmeleri ve gerinim enerjileri hakkında bilgi veren bir darbe makinesinin tanımlanması önemlidir. Darbe testleri beş ana kategoriye ayrılmıştır ve her test ayrıca çeşitli darbe testlerine bölünmüştür. Beş ana kategori, sarkaç darbe testleri, düşen ağırlık darbe testleri, aletli sarkaç darbe testleri, yüksek oranlı aletli darbe testleri ve çeşitli testlerdir [68].

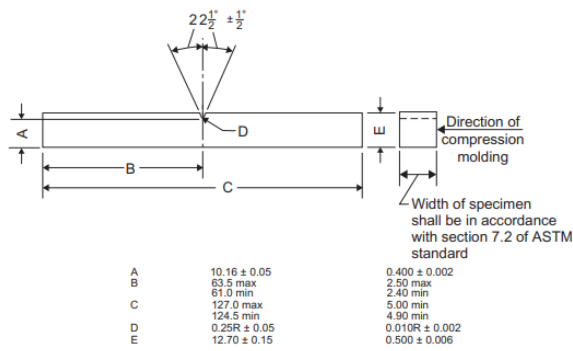
4.1. Charpy Darbe Testi

Charpy darbe testi, standart test yöntemi ASTM D6110'a göre plastiklerin bükülme şoku nedeniyle kırılmaya karşı direncini değerlendirmek için gerçekleştirilir [7]. Numune, montaj, çentiklenme ve darbe anında sarkaç hızı gibi belirli koşullar altında standart test numunelerini kırmak için gereken enerji miktarını gösterir. Şekil 4.1'de gösterildiği gibi, sarkaçlı darbe makinesi, numuneyi tutan bir çift desteği tutan bir tabandan oluşur. Bu destekler sert bir çerçeve ve yataklar, belirli bir numuneyle kullanıma uygun belirli bir başlangıç enerjisine sahip birkaç sarkaç tipi çekiçten biri, bir sarkaç tutma ve bırakma mekanizması ve numunenin kırılma enerjisini gösteren bir mekanizma aracılığıyla bağlanır. . Numune örsü, sarkaç ve çerçeve, hem çarpma anında hem de kırılmanın yayılması sırasında darbe kenarının ve numunenin doğru hizalanmasını korumak ve titreşimden kaynaklanan enerji kayıplarını en aza indirmek için serttir. Sarkacın etkin uzunluğu 0,325 ila 0,406 m arasındadır, böylece çarpma burnunun gerekli yüksekliği sarkacın yatayın üzerinde 60 ila 30 derecelik bir açıya yükseltilmesiyle elde edilir.

Şekil 4.1, standart test yönteminde [12] belirtildiği gibi Charpy tipi test numunesinin boyutunu göstermektedir. Tüm numuneler, tepe noktasında 0,25 x 6 0,05 mm'lik bir eğrilik yarıçapı ile 45 x 6 1 açıyla çentiklenir. Çentik açısını ikiye bölen düzlem, test numunesinin yüzüne 2° içinde diktir. Çentiğin altındaki çubukta kalan plastik malzemenin derinliği 10,2 x 0,05 mm olmalıdır. Belirtilen malzemeden numuneler, genişliği 3,00 ila 12,7 mm arasında ve bir boyutu daha küçük olacak şekilde kalıplanır. 12,7 mm'de çentik kısa tarafta kesilmelidir. Levha malzemeden numuneler hazırlanırken, aksi belirtilmedikçe numuneler levhadan hem boyuna hem de makine yönlerinde kesilir. Sac kalınlığı 3,0 ile 12,7 mm arasında ise numunenin genişliği sac kalınlığı ile aynı olur. Kalınlığı 12,7 mm'den büyük olan saclar 12,7 mm'ye kadar işlenir.



Şekil 4.1 : Charpy darbe testi kurulumu



Şekil 4.2 : Charpy tipi test numunesinin boyutları

Test numuneleri, çentik açma işleminden sonra ve testten önce en az 40 saat boyunca 23 x 6 2 C ve %50 x 6 x 5 bağıl nemde koşullandırılır. Higroskopik malzemenin kalıplanmış numuneleri standart kurutma prosedürlerine (ASTM D4066) göre kurutulur.

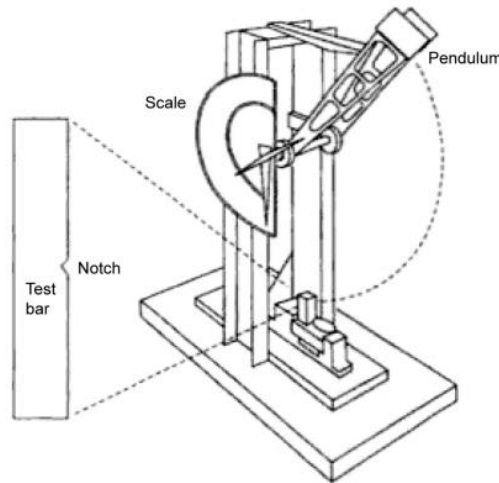
Çentik açma sırasında havaya maruz kalmanın sınırlandırılması ve numunelerin su buharı geçirmeyen bir kapta kapatılması önemlidir. Darbe direncinin ayrı ayrı belirlenmesi ve ortalama darbe direncinin belirlenmesi için en az beş ve tercihen on veya daha fazla numune test edilir. Test numuneleri çentiğin karşısındaki yüze etki edecek şekilde destekler üzerine yatay olarak ve örslere doğru monte edilir. Merkezleme aparatı, çentiği örsler arasında hizalamak için kullanılır. Sarkaç daha sonra kaldırılır ve serbest bırakma mekanizmasına sabitlenir. Bu noktada fazla enerji gösterge mekanizmasının üzerindeki skala sıfırlanır. Sarkaç daha sonra serbest bırakma mekanizmasından serbest bırakılır ve numuneye çarpmak için sarkacın kenarına çarpılır. Ölçek kırılma enerjisini kaydeder ve net kırılma enerjisini hesaplamak için kullanılır. Bu enerji değeri sarkacın nominal enerjisinin %85'inden büyükse yanlış sarkaç kullanılmış demektir. Sonuçlar atılır ve sarkacın yerine daha yüksek kullanılabilir enerji değerine sahip başka bir sarkaç gelir. Daha sonra test yeni bir numune üzerinde tekrarlanır. Belirli bir malzeme için tüm numuneler test edildikten sonra, belirli malzeme için metre başına joule cinsinden darbe direnci hesaplanır.

4.2. Izod Darbe Testi

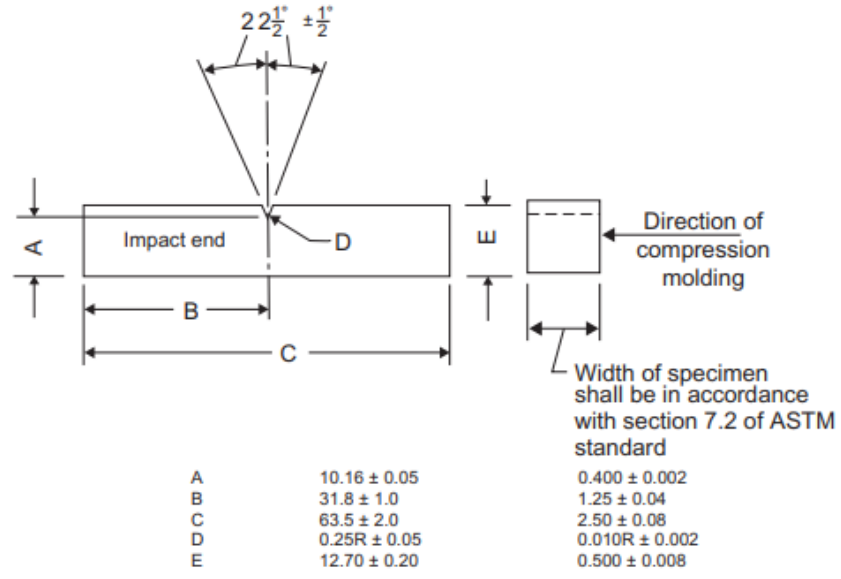
Charpy testi gibi, Izod testi de bir darbe sarkacını içerir, ancak Izod geometrisi, çentiğin darbe noktasıyla aynı tarafta bulunduğu bir konsol girişinden oluşur. Testler Charpy testine benzer olmasına rağmen standart test prosedürü ASTM D256'dan uyarlanmıştır [14]. Bu test, numune montajı, çentiklenme ve darbe anında sarkaç hızının etkisi altında standart test numunelerini kırmak için gereken enerjiyi tahmin eder. Charpy testinde sarkaç numunenin çentiksiz tarafına çarptığı için Charpy değerleri Izod testine göre önemli ölçüde daha yüksek darbe dayanımına sahiptir. Şekil 4.3'de gösterildiği gibi Izod darbe test cihazı, Charpy test cihazındakine benzer bir kurulumdan oluşur. Aynı prensibe dayanarak sarkacın etkin uzunluğunda küçük bir fark vardır. Sarkacın etkin uzunluğu 0,33 ila 0,40 m arasındadır, böylece çarpma burnunun gerekli yüksekliği sarkacın yatayın üzerinde 60 ila 30 derecelik bir açıya yükseltilmesiyle elde edilir.

Şekil 4.3, Izod tipi bir test numunesinin boyutlarını göstermektedir. Tüm numuneler, tepe noktasında 0,25 x 6 0,05 mm'lik bir eğrilik yarıçapı ile 45 x 6 1 açıyla çentiklenir. Çentik açısını ikiye bölen düzlem, test numunesinin yüzüne 2° içinde diktir.

Çentiğin altındaki çubukta kalan plastik malzemenin derinliği 10,16 6 0,05 mm olmalıdır [16].Belirtilen malzemeden numuneler, genişliği 3,00 ile 12,7 mm arasında olacak şekilde kalıplanır ve 12,7 mm'den küçük bir boyutta çentik kısa tarafta kesilmelidir. Genişliği 6,35 mm'den az olan numuneler, daha geniş numunelere göre ezilme, bükülme ve bükülme nedeniyle daha fazla enerji emme eğilimindedir. Bu nedenle genişliği 6,35 mm veya daha fazla olan numunelerin bulundurulması tavsiye edilir. Test numuneleri, çentik açma işleminden sonra ve testten önce en az 40 saat boyunca 23 x 6 2 C ve %50 x 6 x 5 bağıl nemde koşullandırılır. Higroskopik malzemenin kalıplanmış numuneleri standart kurutma prosedürlerine (ASTM D4066) göre kurutulur. Çentik açma sırasında havaya maruz kalmanın sınırlandırılması ve numunelerin su buharı geçirmeyen bir kapta kapatılması önemlidir. Darbe direncinin ayrı ayrı belirlenmesi ve ortalama darbe direncinin belirlenmesi için en az beş ve tercihen on veya daha fazla numune test edilir. Numuneler önceki bölümlerde tartışıldığı gibi benzer metodoloji kullanılarak test edilir. Numunenin kırılma enerjisi tahminine göre her numuneyi enerjisinin %85'ini kaybetmeden kırması beklenen en hafif sarkaç seçilir. Net kopma enerjisi değeri sarkacın nominal enerjisinin %85'inden büyükse yanlış sarkaç kullanılmış demektir. Sonucu atın ve daha büyük kullanılabilir enerjiye sahip başka bir sarkaçla değiştirin. Test yeni bir numune üzerinde tekrarlanır. Belirli bir malzeme için tüm numuneler test edildikten sonra darbe direncini metre başına joule cinsinden hesaplanır.



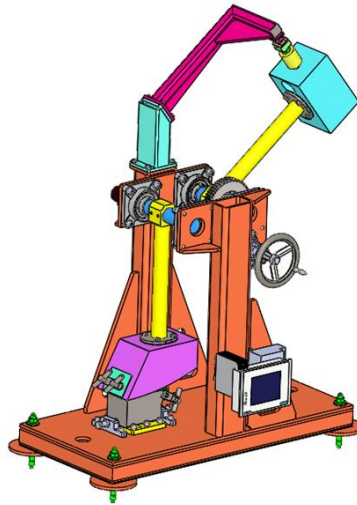
Şekil 4.3 : Izod darbe test cihazı



Şekil 4.4 : Izod tipi test numunesinin boyutu

4.3. Çift Çekiçli Çentik Darbe Testi

Çift çekiçli darbe testi, malzemelerin dayanıklılık ve kırılma özelliklerini değerlendirmek amacıyla kullanılan bir testtir. Bu test, özellikle metal ve plastik gibi malzemelerin darbe dayanıklılığını belirlemek için kullanılır. Ayrıca çift çekiçli çentikli darbe test cihazları genellikle malzemenin çatlamaya veya kırılmaya karşı direncini değerlendirmek amacıyla tasarlanmıştır. Şekil 4.5’de çift çekiçli çentik darbe cihazının görüntüsü verilmiştir.



Şekil 4.5 : Çift çekiçli çentik darbe test cihazının görüntüsü.

Çift çekiçli darbe test cihazının genel çalışma prensibi, malzeme üzerine kontrollü bir darbenin uygulanması ve malzemenin bu darbeye karşı gösterdiği tepkinin ölçülmesidir. Bu test, malzemenin darbeye karşı direncini, çatlama davranışını, kırılma dayanıklılığını ve deformasyon özelliklerini değerlendirmek için kullanılır. Bu cihazın genel çalışma prensibi şu adımlarla sıralanabilir:

Konfigürasyon ve Pozisyonlandırma: Testin başlangıcında, iki çekiç belirli bir konfigürasyonda yerleştirilir. Bir çekiç belirli bir açıyla sabit bir konumda dururken, diğer çekiç ise malzeme üzerine darbeyi uygulamak için hareketlidir.

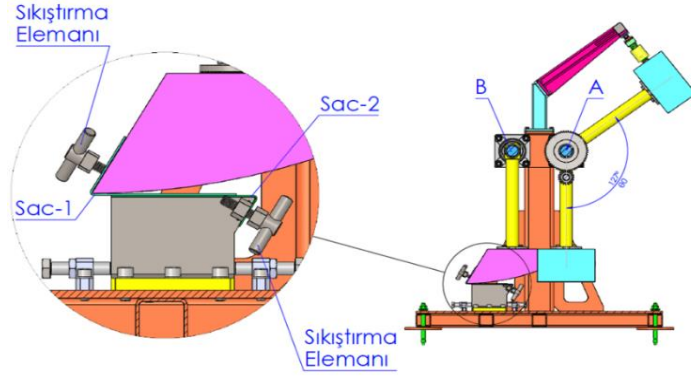
Malzeme Hazırlığı: Test edilecek malzeme, cihaz üzerine yerleştirilir. Malzemenin tipine ve testin amacına bağlı olarak, farklı konfigürasyonlarda hazırlık yapılabilir.

Darbenin Uygulanması: Hareketli çekiç, belirli bir enerji seviyesinde ve kontrol altında malzeme üzerine darbeyi uygular. Bu darbe, malzemenin belirli bir bölgesine odaklanabilir veya geniş bir yüzeye yayılabilir.

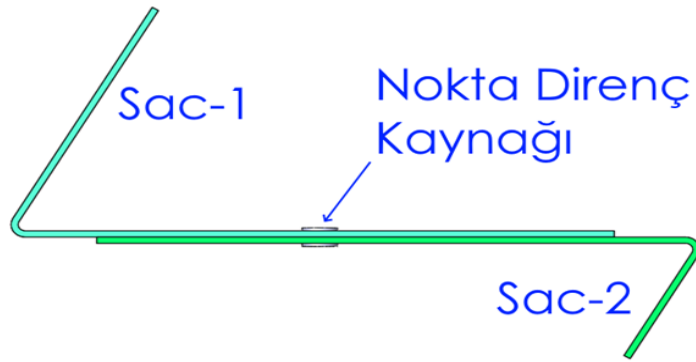
Tepki Ölçümü: Darbenin uygulanmasının ardından, malzemenin çeşitli özellikleri dikkatlice ölçülür. Bu özellikler arasında çatlama, kırılma, deformasyon ve enerji emilimi gibi parametreler bulunabilir.

Sonuçların Analizi: Elde edilen veriler, malzemenin darbeye karşı direncini ve davranışını değerlendirmek için kullanılır. Bu sonuçlar, malzemenin tasarımında, üretiminde veya kalite kontrolünde geliştirmeler yapılması gerekip gerekmediğini belirlemek için önemli bilgiler sağlar. Standart darbe test cihazına benzer bir çalışma prensibi vardır; ancak, bu cihazda iki sarkaç kullanılır ve potansiyel enerji ile kalan enerji ölçümü için sarkaçlar kullanılır. Bir sarkaç, çarpma enerjisini sağlamak için aktif sarkaç olarak görev yapar (şekilde sağ taraftaki turkuaz renkte olan), diğeri ise pasif sarkaçtır. Şekil 4.6'da sarkaçlar A ve B olarak işaretlenmiştir. Test öncesinde, Z şeklinde kaynaklı bir numune, Şekil 4.6'da gösterildiği gibi sarkaç B'ye monte edilir ve diğer uç sabit bir makine tabanına tutturulur. Nokta kaynağı, iki bükülmüş sacın merkezine uygulanır. Numunenin uçlarındaki kıvrımlar, darbe sırasında numunenin güvenli bir şekilde bağlanmasını sağlar. Ayrıca, Şekil 4.7'de çarpma prosedürü de gösterilmiştir.

Bu düzenleme ile ilgili olarak, cihazın özellikleri ve test prosedürleri, güvenli bir bağlantı sağlamak ve doğru ölçümleri elde etmek için dikkatlice tasarlanmıştır.



Şekil 4.6 : Çift çekiçli darbe test makinesi prensibi.



Şekil 4.7 : Z şeklinde bükülmüş kaynaklı sac.

Test öncesi, aktif sarkaç $\theta_0=127^\circ$ açısıyla kaldırılır. Bu aşamada, sistemin belirlenmiş bir potansiyel enerjisi vardır. Giriş enerjisini ayarlamak amacıyla sarkaç üzerine ilave ağırlıklar eklenebilir. Sarkaç serbest bırakıldığında, potansiyel enerjisi kinetik enerjiye dönüşür ve çarpmadan hemen önce A çekiç 0° noktasında maksimum enerji değerine ulaşır. Darbe sonrasında, darbe alanındaki pasif sarkaç, darbe yönünde hareket etme eğilimindedir ve numuneyi ayırma eğilimindedir. Yeterli giriş enerjisi sağlandığında, numune bağlantı noktasından iki parçaya ayrılacak ve sistemde kalan enerji nedeniyle her iki sarkaç da ileri doğru sallanmaya devam edecektir. Bu durum, sistemin çarpmadan sonra enerji transferini ve malzemenin davranışını değerlendirmek için kullanılan bir test prosedürünü ifade eder.

4.4 Darbe Dayanımına Etki Eden Faktörler

Darbe dayanımını etkileyen bir dizi faktör bulunmaktadır. Malzeme özellikleri, geometrik yapı, test koşulları ve çevresel faktörler, darbe dayanımını belirleyen önemli etkenlerdir. Darbe dayanımını etkileyen faktörleri şu şekilde sıralayabiliriz:

Malzeme Türü: Her malzemin darbe dayanımı farklıdır. Metal, plastik, seramik ve kompozit malzemeler gibi farklı malzeme türleri, farklı enerji emilme ve dağıtma yeteneklerine sahiptir.

Malzeme Mikro Yapısı: Malzemenin içsel mikro yapısı, özellikle kristalin yapı, tane boyutu ve mikro çatlaklar, darbe dayanımını etkiler. Homojen ve düzenli bir mikro yapı, genellikle daha iyi darbe dayanımına sahip olabilir.

Malzeme Sertliği: Malzemenin sertliği, darbe dayanımını etkileyen önemli bir faktördür. Daha sert malzemeler genellikle daha iyi darbe direncine sahip olabilir, ancak aşırı sertlik kırılabilirliği artırabilir.

Geometrik Yapı ve Şekil: Malzemenin şekli, boyutu ve geometrisi darbe direncini büyük ölçüde etkiler. Özellikle çentikler, çatlaklar veya keskin köşeler, darbeye karşı zayıf bölgeler oluşturabilir.

Darbe Yükü Hızı: Darbe yükünün malzeme üzerine uygulanma hızı, darbe direncini etkiler. Hızlı darbeler genellikle malzemelerin kırılma davranışını etkileyebilir.

Çevresel Koşullar: Sıcaklık, nem ve diğer çevresel koşullar darbe dayanımını etkileyebilir. Özellikle bazı malzemeler, belirli sıcaklık veya nem seviyelerinde daha hassas olabilir.

Numune Hazırlığı: Numunenin işleme ve hazırlık yöntemleri, darbe dayanımını etkileyebilir. Kalitesiz kaynaklar, hatalı işlemler veya malzeme kusurları, darbe direncini azaltabilir.

Test Koşulları: Darbe testi sırasında uygulanan koşullar, özellikle darbe enerjisi, darbe açısı ve test ortamı gibi faktörler, sonuçları etkiler.

BÖLÜM 5. DENEYSEL ÇALIŞMALAR

5.1. Malzemenin Bileşimi ve Kimyasal Özellikleri

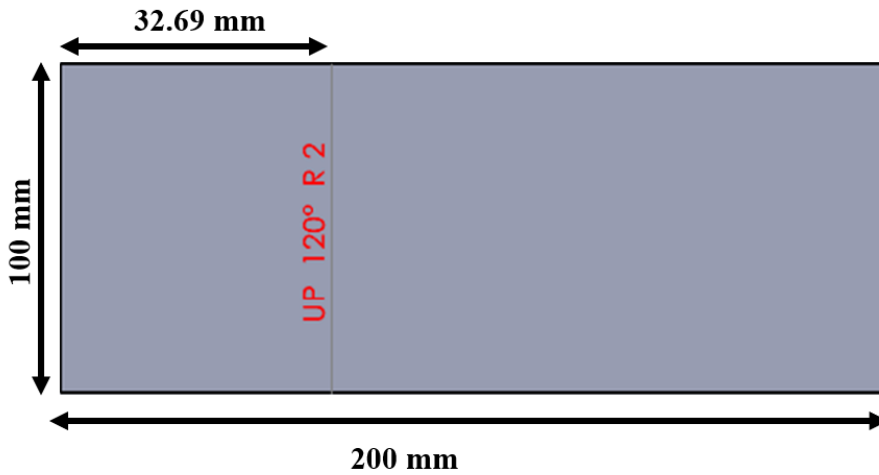
Yapılan çalışmada otomotiv sektöründe sıklıkla kullanılan SCGA590 (DP600) çift fazlı galvanizli çelik kullanılmıştır. Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi Tablo 5.1’de ve kullanılan malzemenin mekanik özellikleri Tablo 5.2’de yer almaktadır. Her bir numune başlangıçta 1.2x100x200 mm boyutlarında kesilmiştir. 1.2x100x200 mm boyutundaki numunenin teknik resmi Şekil 5.1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 : Kullanılan malzemenin kimyasal bileşimi.

Malzemede yer alan elementler	% C	% Mn	% P	% S	% Si	% Al
SCGA590 (DP600)	0.23	3.3	0.09	0.015	2	0.01 Min.

Tablo 5.2 : Kullanılan malzemenin mekanik özellikleri.

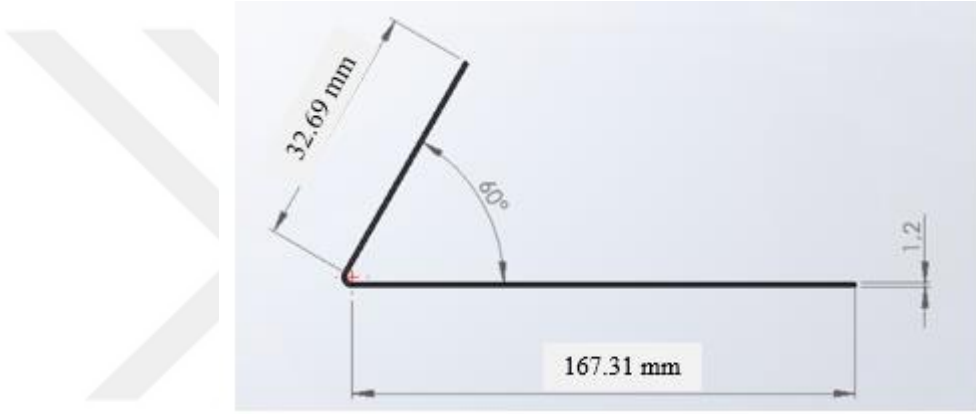
Malzeme adı ve mekanik özellikleri	Akma Dayanımı (MPa)	Çekme Dayanımı (MPa)	Uzama Miktarı (Min/Max)
SCGA590 (DP600)	305	590	20/35



Şekil 5.1 : 1.2x100x200 mm boyutlarında kesilmiş numune.

5.2. Numunelere Uygulanan Abkant Büküm İşlemi

Numunelerin belirlenen standartlarda kesilmesi sonrasında numuneler abkant büküm işlemine tabi tutulmuştur. Bu işlemin amacı metal levha veya sac malzemelerin belirli bir şekil veya eğriye bükülmesini sağlamaktır. Numunelere Şekil 5.2’de görüldüğü gibi numuneler abkant tezgahlarında 60° açı ile 80 mm mesafeden bükme işlemine tabi tutulmuştur. Şekil 5.3’de numuneye uygulanan abkant bükme işlemi sonrasında numunenin görüntüsü görülmektedir. Aynı zamanda bu işlem genellikle metal levha işleme endüstrisinde kullanılır ve çeşitli metal parçaların, bileşenlerin veya ürünlerin üretiminde önemli bir aşamayı oluşturur.



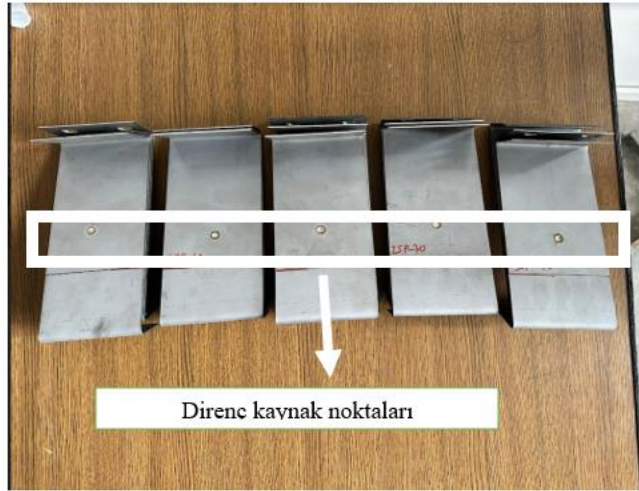
Şekil 5.2 : Numuneye verilen büküm açısının gösterimi.



Şekil 5.3 : Abkant büküm yapılan numunenin yakın mesafeden görüntüsü.

5.3. Nokta Direnç Kaynağı İşlemi

Abkant büküm yapılan numuneler büküm yönleri terse bakacak şekilde 120 kVA gücünde tek kollu zaman ve akımın elektronik kontrolünün sağlandığı nokta direnç kaynak makinesinde birleştirilmiştir. Numuneye uygulanan nokta direnç kaynağı işlemi sonucunda numunelerin görüntüsü Şekil 5.4’de verilmiştir. Numuneler 5 farklı periyot olacak şekilde (10,15,20,25,30) kaynak işlemine tabi tutulmuştur. Nokta direnç kaynağından bir önceki bölümlerden ayrıntılı bahsedilmiş olup kısaca şöyle özetlenebilir. Nokta direnç kaynağı, iki metal parçayı birbirine bağlamak için elektrik direncini kullanır. İki metal parça, bir noktada birleştirilir ve bir direnç kaynağı makinesi aracılığıyla belirli bir süre ve belirli bir elektrik akımı ile ısınır. Bu ısı, metal parçaların erimesine ve birbirine kaynamasına neden olur. Aynı zamanda nokta direnç kaynağı işleminin parametrelerinden biri olan kaynak elektrotu olarak CRM 16 X tipi elektrot kullanılmıştır. Elektrot malzemesinin kimyasal bileşimi Bakır (Cu), Krom (Cr) ve Zirkonya (Zr) ‘dan oluşmaktadır. Aynı zamanda elektrot malzemesinin ısı iletkenlik değeri 320 J/cmsK ve elektrik iletkenliği 48 m/Ωmm²’dir. Bu çalışmada elektrot malzemesinin yarıçapı 16 mm’dir.



Şekil 5.4 : Nokta direnç kaynağı ile birleştirilen numunelerin görüntüsü.

5.4. Numunelere Çift Çekiçli Çentik Darbe Testinin Uygulanması

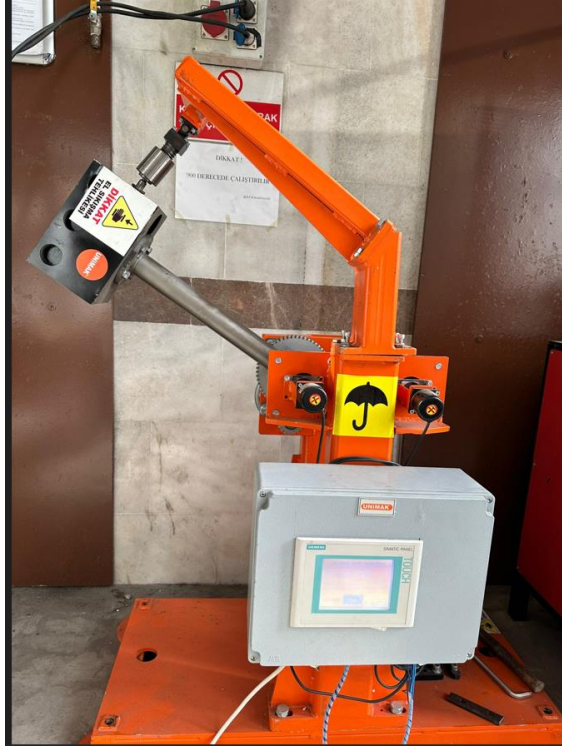
Farklı periyotlarda test edilen numunelerin direnç nokta kaynağının mekanik özelliklerinin incelenmesi, mikroyapısında meydana gelen değişimlerin analiz edilmesi ve için numuneler öncelikle çift çekiçli darbe testine tabi tutulmuşlardır. Çift çekiçli

çentik darbe testinin çalışma prensibi şu şekilde özetlenebilir : Metallerin çentikli darbe testi, keskin bir gerilim yükselticinin (çentik) mevcut olduğu ani kırılmaya yol açan yüksek hızlı yükleme koşulları altında arıza modu hakkında bilgi sağlar. Kırılma sırasında emilen enerji genellikle bazı referanslarda tokluk olarak adlandırılan gerilim-gerinim eğrisinin altındaki alanla ilgilidir. Gevrek malzemeler, gerilim-gerinim eğrisinin altında küçük bir alana sahiptir (sınırlı tokluklarından dolayı) ve sonuç olarak darbe kırılması sırasında çok az enerji emilir. Malzemelerin plastik deformasyon yeteneği (süneklik) arttıkça eğri altında kalan alan da artar ve emilen enerji ve buna bağlı olarak tokluk artar. Kırılan numunelerin kırılma yüzeylerinde de benzer özellikler görülebilir. Gevrek davranışa işaret eden, düşük enerjili darbe hasarları için kırılma yüzeyleri nispeten pürüzsüzdür ve metallerde kristalimsi bir görünüme sahiptir. Aksine, yüksek enerjili kırılmalar için olanlarda, kırılma yüzeyinin çekme gerilimine göre yaklaşık 45° eğimli olduğu kayma bölgeleri vardır ve lifli kırılma adı verilen daha pürüzlü ve daha fazla deforme olmuş bir görünüme sahiptir. Çarpma enerjisini ölçmek için iki standart test olan Charpy ve Izod tasarlanmış ve yaygın olarak kullanılmış olmasına rağmen, Charpy v-çentikli darbe testleri pratikte daha yaygındır.

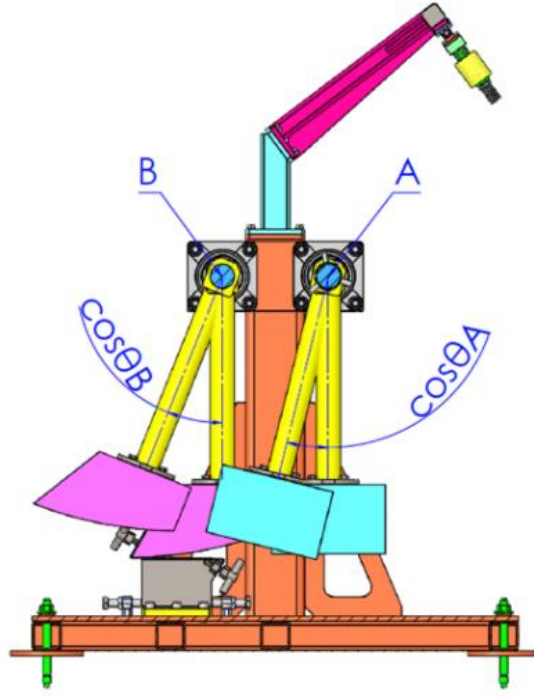
Çalışmada çift çekiçli darbe testinin gerçekleşmesinden önce numune yapılan işlem, kullanılan çift çekiçli darbe testlerini gerçekleştirmek için kullanılan cihaz, Çift çekiçli darbe test makinesinin test sonrası konumu ve darbe testine tabi tutulan numunelerin görüntüsü sırasıyla Şekil 5.5, Şekil 5.6 ve Şekil 5.7, Şekil 5.8’da verilmiştir.



Şekil 5.5 : Darbe testi öncesinde numuneye yapılan ön işlem.



Şekil 5.6 : Tez kapsamında kullanılan çift çekiçli darbe test cihazının görüntüsü.



Şekil 5.7 : Çift çekikli darbe test cihazının test sonrası konumu.

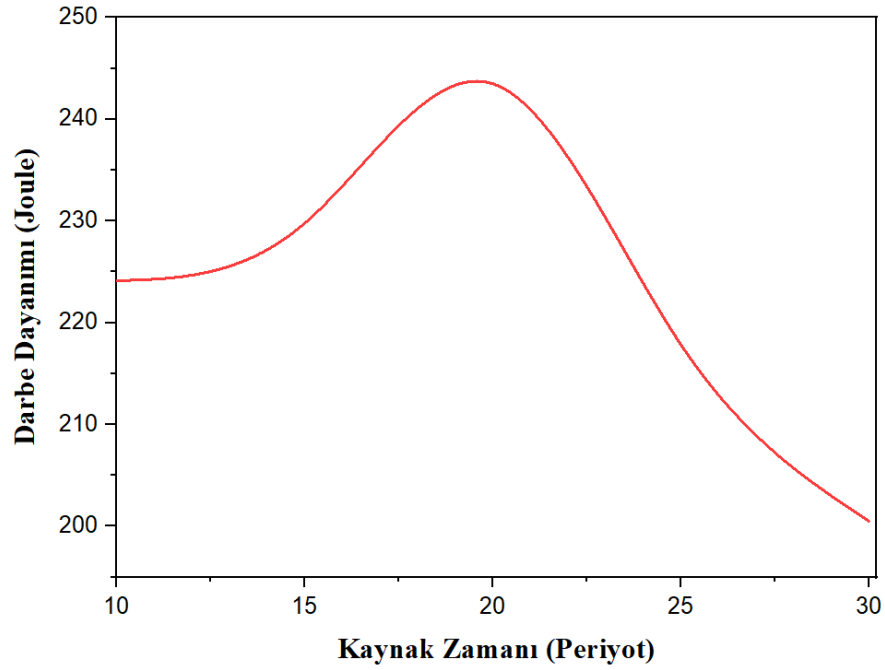


Şekil 5.8 : Darbe testi sonrasında numunede meydana gelen ayrılma.

Tez çalışması kapsamında Tablo 5.3’de farklı periyotlara sahip nokta direnç kaynaklı numunelerin oda sıcaklığında yapılan darbe testi sonucunda elde edilen dayanım değerleri ve Şekil 5.9’da kaynak zamanı - darbe dayanımı grafiği görülmektedir. Kaynak zamanındaki artış ile numunenin dayanım değerlerinin belirli bir periyoda kadar artış gösterdiği 20 periyottan sonra test edilen numunede darbe dayanımında azalma meydana geldiği ve 30. Periyottan sonra numunede kırılma meydana geldiği (Şekil 5.8) görülmektedir.

Tablo 5.3 : Darbe testi sonucunda elde edilen dayanım değerleri.

Numune simgesi	Kaynak zamanı (periyot)	Darbe dayanımı (Joule)
SCGA590-1	10	224.129
SCGA590-2	15	229.765
SCGA590-3	20	243.487
SCGA590-4	25	217.857
SCGA590-5	30	200.488

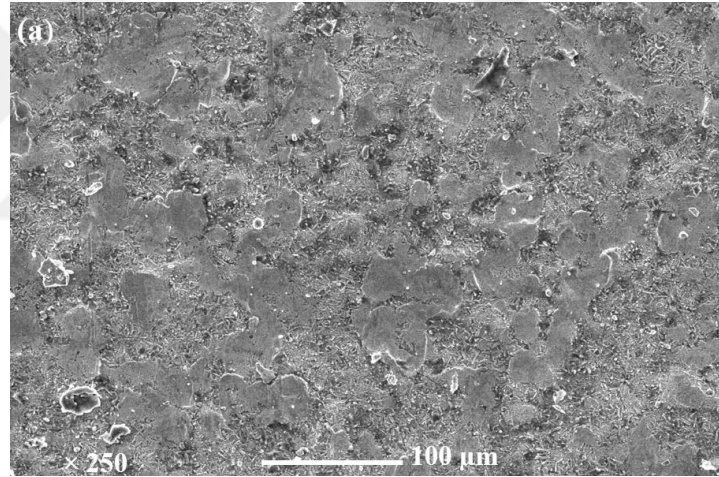


Şekil 5.9 : Kaynak zamanı - darbe dayanımı grafiği.

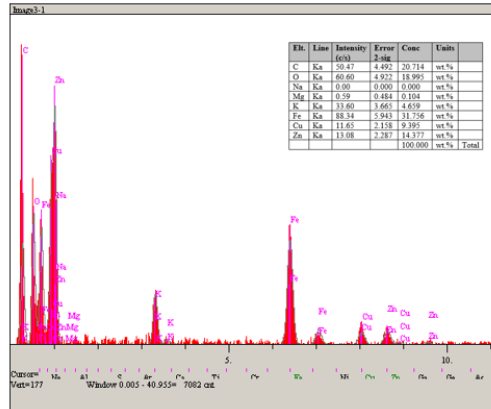
5.5. Numuneye Ait Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) Görüntüleri

Numunenin faz yapısını incelemek, numunede yer alan elemntlerin tayinini gerçekleştirmek ve periyot süresindeki artış ile punta kaynağının mikroyapısında meydana gelmek değişimde gözlemlemek amacı ile her bir periyota ait punta kaynağından alınan taramalı elektron mikroskobu analizi (SEM) sonuçları ve ana metalden alınan elementel haritalama analizi (EDS) sonuçları görülmektedir.

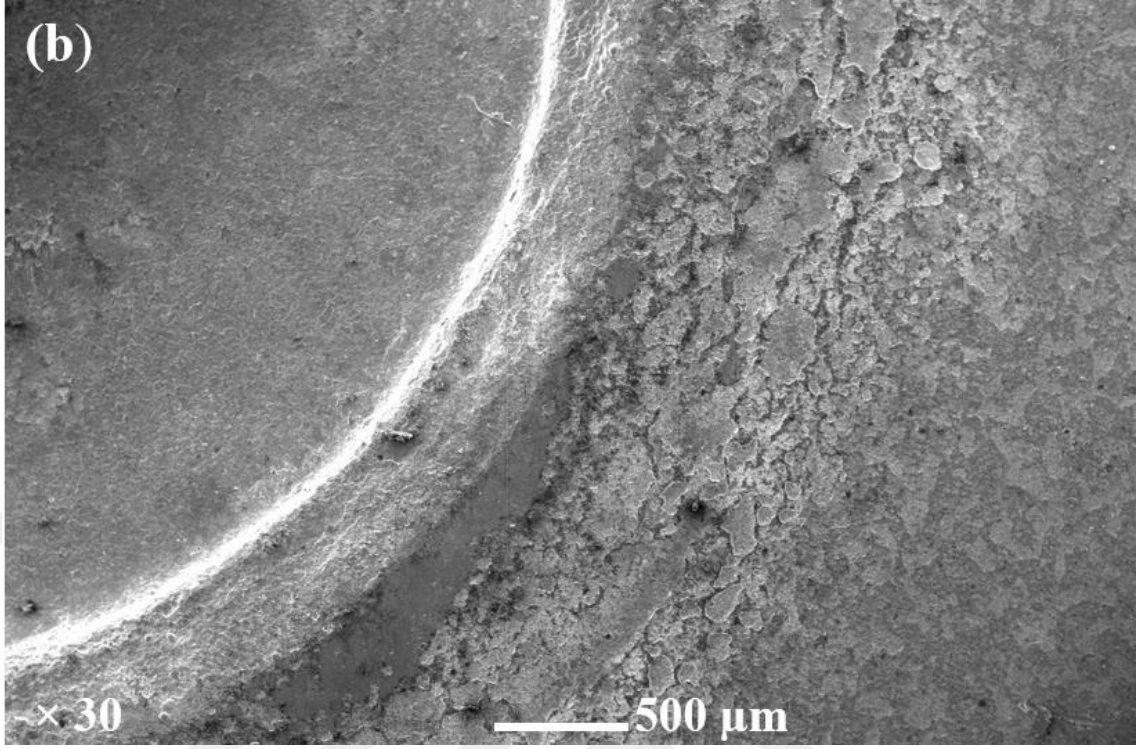
Ana metalin elementel haritalama analizi sonucuna bakıldığında SCGA590 malzemesinin içinde yer alan elemntler oranlarının yüzdelerinin piklerin altında kalan alanların yüzdeleri ile orantılı olduğu görülmektedir. EDS analizinde yer alan bakır, zirkonya ve krom elementleri kullanılan elektrot malzemesinin bileşiminden ötürü yapıya katılmaktadır ve geri kalan elementler çelik bileşiminde yer almaktadır. Ana metalin mikroyapısını martenzit iğneleri oluşturmaktadır.



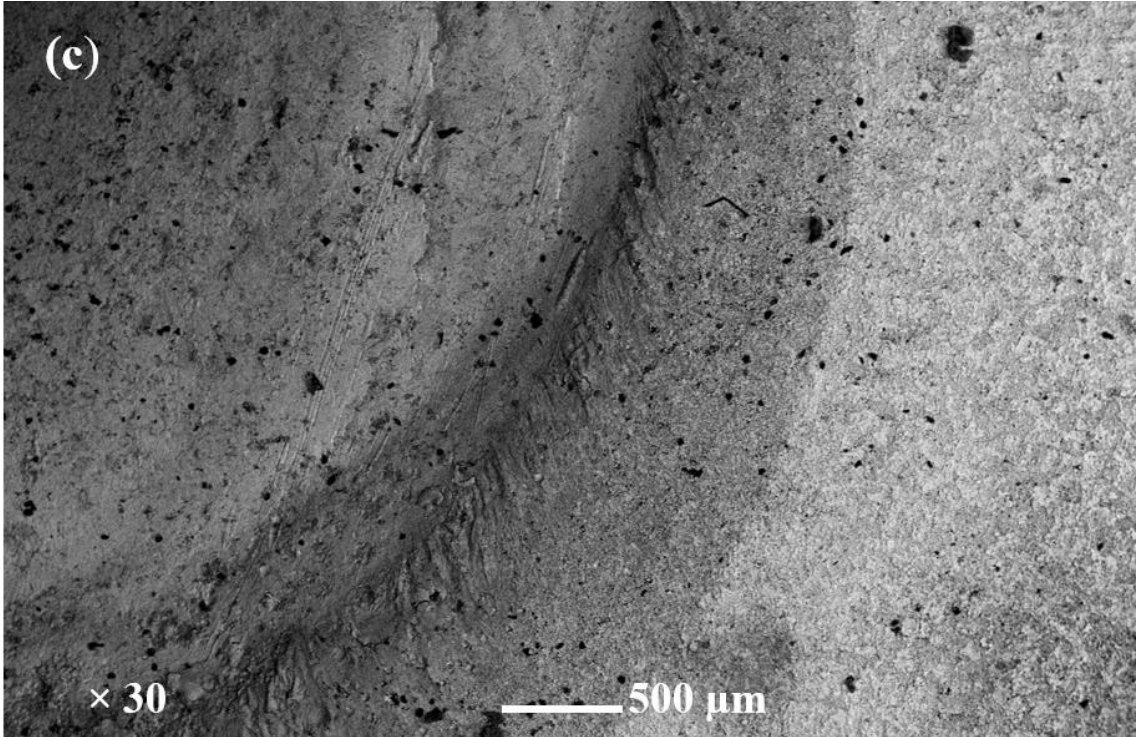
Şekil 5.10 : Ana metalin taramalı elektron mikroskobu (SEM) analizi görüntüsü



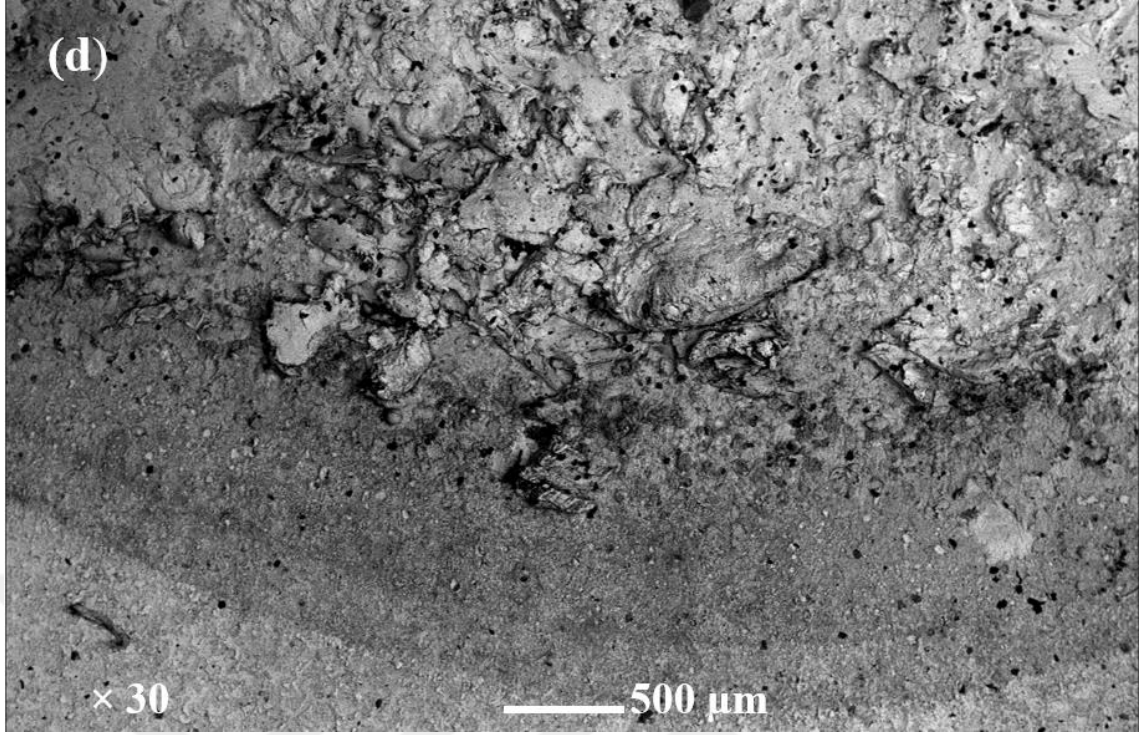
Şekil 5.11 : Ana metalin elementel haritalama analizi sonuçları ve EDS paterni.



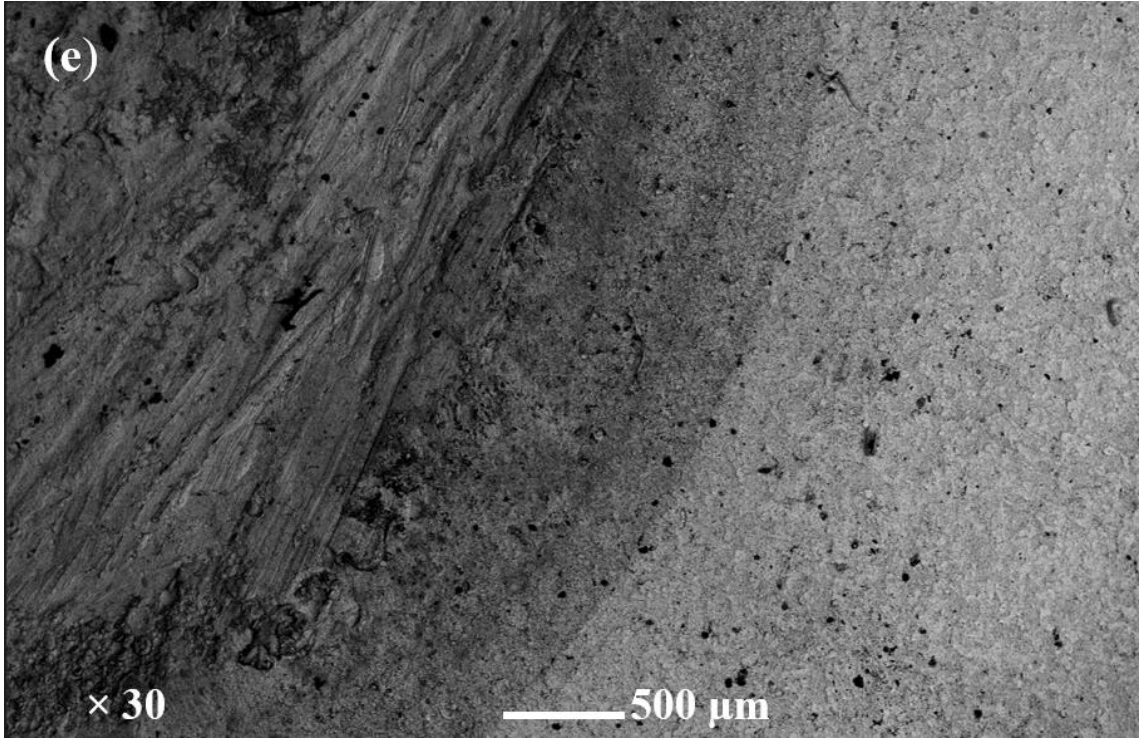
Şekil 5.12 : Kaynak süresi 10 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.



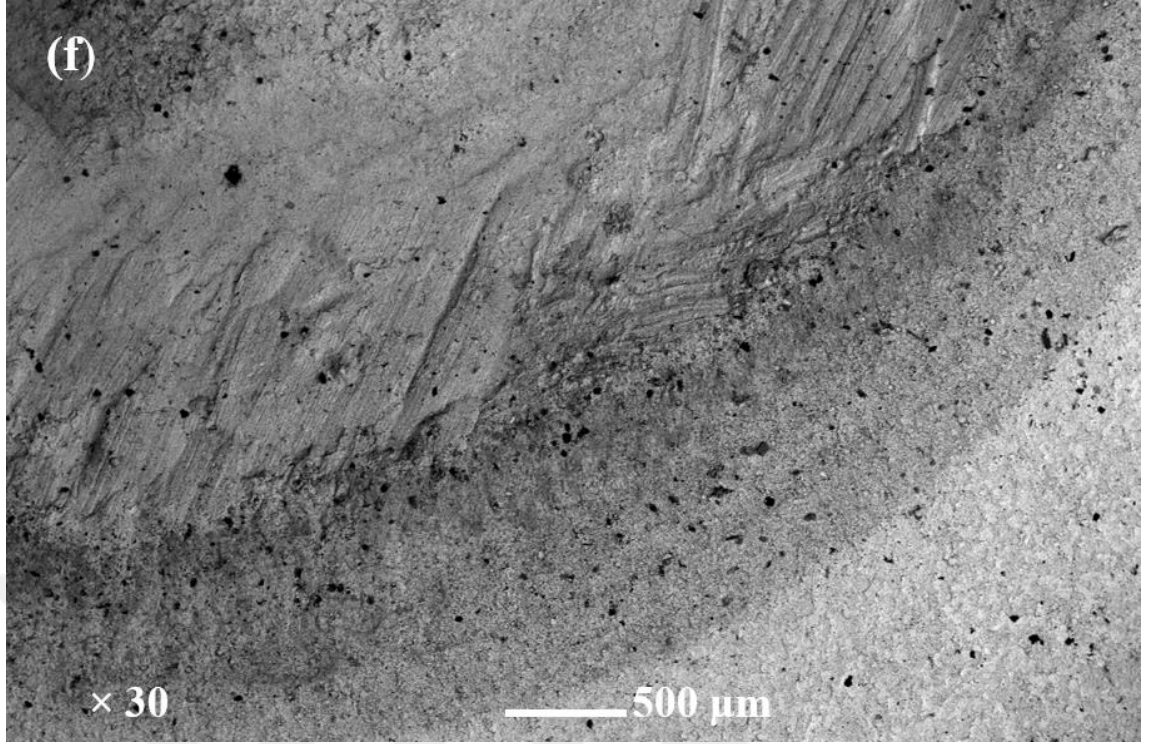
Şekil 5.13 : Kaynak süresi 15 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.14 : Kaynak süresi 20 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.15 : Kaynak süresi 25 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.



Şekil 5.16 : Kaynak süresi 30 periyot olan numunenin SEM görüntüsü.

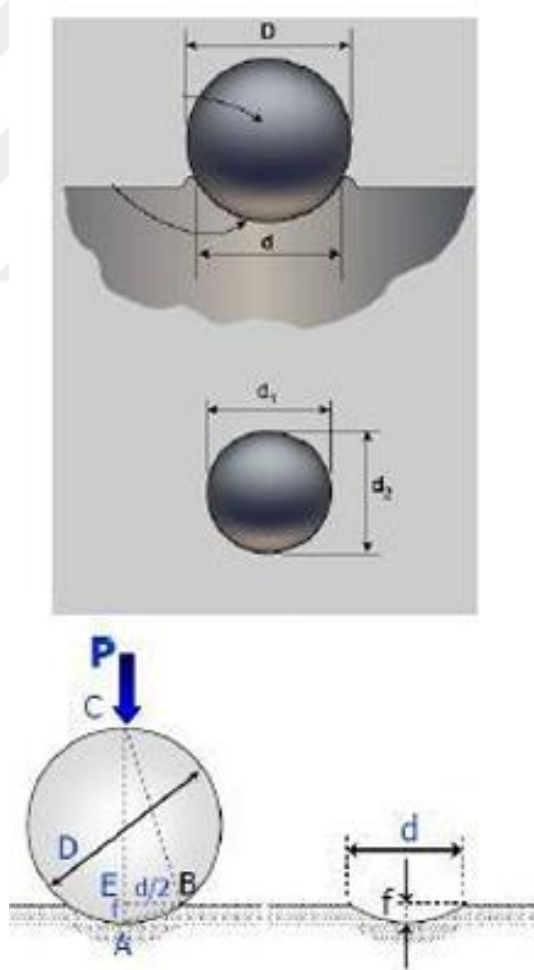
Kaynaklanmış numunelerin mikroyapılarına bakıldığında karşımıza 3 bölge çıkmaktadır. Bu bölgeler : ana malzeme, ısı tesiri altındaki bölge (ITAB) ve kaynak metalidir. ITAB bölgesini mikroyapı resimlerine bakıldığında şu şekilde ayırt edilebilir : Erime çizgisinin esas metal tarafında, kaynak sırasında uygulanmış olan ısıнын oluşturduğu çeşitli ısı çevrimlerden etkilenmiş ve dolayısıyla içyapı değişimine uğramış bir bölge vardır; bu bölgeye ısıнын tesiri altında kalan bölge adı verilir. Aynı zamanda sıcaklık tesiri ile base metal olarak adlandırılan ana metalde tane büyümesi artışı meydana gelmektedir.

5.6. Malzemeye İlişkin Mikrosertlik Sonuçları

Malzemelere ilişkin mikrosertlik ölçümleri brinell mikrosertlik test yöntemi kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Bu yöntemde, malzemenin yüzeyine belirli bir yük uygulanarak oluşan mikroskobik bir izin çapının ölçülmesi esasına dayanır. (Şekil 5.17) Brinell mikrosertlik testi yapılırken şu adımlar uygulanmıştır.

1. **Test Numunesinin Hazırlığı:** Test edilecek numunenin yüzey temizliği yapılmıştır. Sertlik ölçümü alınacak numunenin yüzeyi düz ve temiz olmalıdır. Eğer numune büyükse, düz bir yüzeyi seçmek bu testte önemlidir.

2. **Çelik Topun Seçimi:** Brinell testi için kullanılacak çelik topun çapını belirlenmiştir. Genellikle, 10 mm çapındaki bir çelik top tercih edilir.
3. **Yük ve Süre Belirleme:** Belirli bir yük (genellikle 500 kgf) belirlenmiştir ve bu yükü belirli bir süre boyunca (genellikle 10 ila 30 saniye) numuneye uygulanmıştır.
4. **Çelik Topu Uygulanması:** Belirlenen yükü uygulamadan önce çelik top numunenin yüzeyine oturtulmuştur.
5. **Yükün Uygulanması:** Belirlenen yükü numuneye uygulanmış ve belirlenen süre boyunca bekletilmiştir.
6. **Yükün Kaldırılması:** Belirlenen süre sonunda yükü kaldırmıştır.
7. **İz Bırakan Çelik Topun Çapını Ölçülmesi:** Numune üzerinde oluşan izi ölçün ve bu izin çapını belirlenmiştir.



Şekil 5.17 : Brinell sertlik ölçme yönteminin şematize edilmesi.

Brinell sertlik değeri aşağıdaki formülasyonlara göre hesaplanır. Bu formülasyonlarda P ile ifade edilen kg, D ile ifade edilen (mm) ve d (mm) değişkenlerini simgelemektedir.

$$BSD = \frac{P}{S} = \frac{P}{\pi D f} \quad BSD = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Kaynaklanmış SCGA590 (DP600) numunelerinin kaynak noktasından malzemenin yüzeyine doğru alınan mikrosertlik sonuçları Tablo 5.4’de ve merkezden uzaklıklarına karşılık gelen sertlik değerlerini görülmektedir. Yapılan mikrosertlik testi ısı tesiri altındaki bölge (ITAB), kaynak bölgesi ve ana metalden oluşmaktadır. Kaynak bölgesinden ana malzemeye doğru gidildikçe sertlik değerinde düşüş görüldüğü ve bunun nedeninin ana malzemenin kaynak malzemesine göre daha yumuşak olmasından kaynaklandığı çalışma sonucunda raporlanmıştır.

Tablo 5.4 : SCGA590 numunesine ilişkin mikrosertlik sonuçları.

Y	X	Merkezden Uzaklık	SCGA590 (HB)	SCGA590 (HB)
2000	1000	1866.5784113	341.6	357.8
1000	1000	1238.5746389	357.8	378.9
500	500	608.1896527	392.4	381.4
200	200	243.4697584	414.3	416.8
100	100	121.6574597	420.8	424.6
50	50	61.2469875	436.7	438.2
25	25	30.1735942	440	439
25	200	212.4369745	429	423,2
25	500	425.6456987	420.4	427,6
25	1000	976.456874	424,3	421.8

BÖLÜM 6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Bu çalışmada otomotiv sektöründe kullanılan SCGA590 (DP600) sacların direnç nokta kaynağında mekanik özellikleri incelemiştir.

Çalışmanın sonucunda farklı kaynak sürelerinde test edilen numunelerin kaynak süresindeki artış ile birlikte darbe dayanım değerlerinde de belirli periyota kadar artış meydana geldiği ve belirli kaynak süresinden sonra darbe dayanımında azalma meydana gelerek numunenin kırıldığı gözlemlenmiştir.

Aynı zamanda yapılan Brinell sertlik testleri sonucunda kaynak bölgesinden ana metale doğru yaklaştıkça sertlik değerinde düşüşler saptanmıştır. Bunun nedeni kaynak malzemesinin sertlik değerinin ana metalin sertlik değerinden daha yüksek olmasıdır.

Taramalı Elektron Mikroskobu (SEM) analizinde yapıyı oluşturan ferrit ve martenzit iğneleri açıkça görülmüş olup kaynak bölgesinde yapılan EDS analizi ile kullanılan elektrot malzemesinin bileşimi de teyit edilmiştir. Kaynak süresinin artmasıyla birlikte tane büyümlerinin meydana geldiği mikroyapı görüntülerinden anlaşılmaktadır.

Bu çalışmada nokta kaynaklı numunelerin darbe dayanımları oda sıcaklığında yapılan testlerle belirlenmiştir. Gelecekteki çalışmalarda darbe testleri 0 °C'nin altında ve oda sıcaklığının üzerinde farklı sıcaklıklarda gerçekleştirilerek otomotiv sektöründe nokta kaynaklı bağlantıların farklı sıcaklık ortamlarında darbe dayanımı açısından nasıl davrandığını anlamak mümkün olabilir

KAYNAKLAR

- [1] S. Aslanlar, “Galvanizli Kromatlı Mikro Alaşımlı Çeliklerin Elektrik Direnç Nokta Kaynağında Uygun Hasar Modunun Tespiti.” Bursa, p. 90, 1999.
- [2] N. Akkas, “Raylı Sistem Araçlarında Kullanılan Atmosferik Korozyona Dayanıklı Çelik Sacların Birleştirilme Kabiliyetinin İncelenmesi,” 2014.
- [3] Granbom, Y., “Structure and mechanical properties of dual phase steels: An experimental and theoretical analysis”, KTH. (2010).
- [4] Rana, R. and Singh, S. B. "Automotive steels: design, metallurgy, processing and applications," Woodhead Publishing, London, UK, 10-11 (2016).
- [5] Kumar, A. Singh, S. and Ray, K. "Influence of bainite/martensite-content on the tensile properties of low carbon dual-phase steels," Materials Science and Engineering: A, 474 (1): 270-282 2008.
- [6] Saeidi, N. and Ekrami, A., "Comparison of mechanical properties of martensite/ferrite and bainite/ferrite dual phase 4340 steels," Materials Science and Engineering: A, 523 (1): 125-129 2009.
- [7] Ramazani, A., Pinard, P. Richter, S. Schwedt, A. and Prah, U., "Characterisation of microstructure and modelling of flow behaviour of bainite-aided dual-phase steel," Computational Materials Science, 80 (1): 134-141 (2013).
- [8] Meng, Q., Li, J., Wang, J., Zhang, Z., and Zhang, L., “Effect of water quenching process on microstructure and tensile properties of low alloy cold rolled dual-phase steel”, Materials & Design, 30(7): 2379-2385 (2009)
- [9] Thomas, G., Speer, J., and Matlock, D., “Quenched and partitioned microstructures produced via Gleeble simulations of hot-strip mill cooling practices”, Metallurgical and Materials Transactions A, 42(12): 3652-3659 (2011).
- [10] Singh, S., and Nanda, T., “A Review: Production of Third Generation Advance High Strength Steels”
- [11] Ahmad, E., Manzoor, T., Hussain, N., and Qazi, N. K., “Effect of thermomechanical processing on hardenability and tensile fracture of dual-phase steel”, Materials & Design, 29(2): 450-457 (2008)

- [12] Dziedzic, M., and Turczyn, S., "Experimental and numerical investigation of strip rolling from dual phase steel", *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, 10(4): 21-30 (2010).
- [13] Akbarpour, M.R., and Ekrami, A., "Effect of ferrite volume fraction on work hardening behavior of high bainite dual phase (DP) steels", *Materials Science and Engineering: A*, 477(1): 306-310(2008).
- [14] Asadi, M., De Cooman, B.C., and Palkowski, H., "Influence of martensite volume fraction and cooling rate on the properties of thermomechanically processed dual phase steel", *Materials Science and Engineering: A*, 538: 42- 52 (2012).
- [15] Xiong, Z. P., Kostryzhev, A. G., Stanford, N. E., and Pereloma, E. V., "Microstructures and mechanical properties of dual phase steel produced by laboratory simulated strip casting", *Materials & Design*, 88: 537-549 (2015).
- [16] Avramovic-Cingara, G., Ososkov, Y., Jain, M. K., and Wilkinson, D. S., "Effect of martensite distribution on damage behaviour in DP600 dual phase steels", *Materials Science and Engineering: A*, 516(1): 7-16 (2009).
- [17] Mazinani, M., and Poole, W., "Effect of martensite plasticity on the deformation behavior of a low-carbon dual-phase steel", *Metallurgical and materials transactions A*, 38(2): 328-339 (2007).
- [18] Peng-Heng, C. and Preban, A., "The effect of ferrite grain size and martensite volume fraction on the tensile properties of dual phase steel", *Acta Metallurgica*, 33(5): 897-903 (1985).
- [19] Jiang, Z., Guan, Z., and Lian, J., "Effects of microstructural variables on the deformation behaviour of dual-phase steel", *Materials Science and Engineering: A*, 190(1-2): 55-64 (1995).
- [20] Jiang, C., Chiang, J., Zhao, J., and Zhou, Y., "A new perspective on failure modes and weldability lobe of resistance spot welds of advanced high strength steels", in *AWS Sheet Metal Welding Conference XI*, Sterling Heights, Mich. Pape (2004).
- [21] Calcagnotto, M., Adachi, Y., Ponge, D., and Raabe, D., "Deformation and fracture mechanisms in fine-and ultrafine-grained ferrite/martensite dualphase steels and the effect of aging", *Acta Materialia*, 59(2): 658-670 (2011).
- [22] Kuo, M. and J. Chiang, "Weldability study of resistance spot welds and minimum weld button size methodology development for DP steel", *SAE Technical Paper*, (2004).
- [23] Kahraman, N., "The influence of welding parameters on the joint strength of resistance spot-welded titanium sheets," *Materials & Design*, 28 (1): 420-427 (2007).

- [24] Sun, D., Lang, B. Sun, D. and Li, J., "Microstructures and mechanical properties of resistance spot welded magnesium alloy joints," *Materials Science and Engineering: A*, 460 (1): 494-498 (2007).
- [25] McCallum, B. "Characterization of DP600 Steel Subject to Electrohydraulic Forming," *Archives Of Civil And Mechanical Engineering*, Paris, France, 11- 13 (2014).
- [26] Zhang, X., Chen, G. Zhang,Y. and Lai, X., "Improvement of resistance spot weldability for dual-phase (DP600) steels using servo gun," *Journal of Materials Processing Technology*, 209 (1): 2671-2675 (2009).
- [27] Han, L. Thornton, M. and Shergold, M. "A comparison of the mechanical behaviour of self-piercing riveted and resistance spot welded aluminium sheets for the automotive industry," *Materials & Design*, 31 (1): 1457-1467 (2010).
- [28] Cecil, D. G., "Resistance projection welding system and method for welding a fastener element to a workpiece," *Google Patents*, Kalifornia, USA, 20-26 (1998).
- [29] Baur, R., "WM Steen, Laser Material Processing , Springer, Heidelberg (2003) ISBN 1-85233-698-6 (XV/408pp., 257, illust., EUR69. 95, \$59.95, Softcover)," *Optik*, 117 (1): 488-488 (2006).
- [30] Amirthalingam ,M. Hermans, M. and Richardson, I., "Microstructural Development during Welding of Silicon-and Aluminum-Based TransformationInduced Plasticity Steels—Inclusion and Elemental Partitioning Analysis," *Metallurgical and Materials Transactions A*, 40 (1): 901 (2009).
- [31] Anik, S., "Welding technique handbook, processes and equipments," *Kansu Printed*, Turkey, 21-24 (1991).
- [32] Boyer, H. E., Gall, T. L., *Metals Handbook*, Desk Edition, American Society for Metals, 1985.
- [33] Sakae, F., Hiroshi, K., Chiaki, K. *Assessment and Application Technologies for Automotive Materials (Perforation)—Techniques for Corrosion 78 Resistance and Perforation Feedback for Automotive Steel Materials*, JFE Technical Report (4) p.9-16, 2004.
- [34] Mendoza, R., Huante, J., Alanis, M., Rivera, C.G. ve Islas, J.A., (2000), "Processing of Ultra Low Carbon Steels with Mechanical Properties Adequate for Automotive Applications in the As-annealed Condition", *Materials Science and Engineering A*, 276: 203-209.
- [35] Pero-Sanz, J., Ruiz-Delgado, M., Martinez, V. ve Verdaja, J.I., (1999), "Annealing Textures for Drawability : Influence of the Degree of Cold Rolling Reduction for Low Carbon and Extra Low Carbon Ferritic Steels", *Elsevier Science Inc.*, Madrid.

- [36] Zhao, D., Wang, Y., Sheng, S., and Lin, Z., “Multi-objective optimal design of small scale resistance spot welding process with principal component analysis and response surface methodology”, *Journal of Intelligent Manufacturing*, 25(6): 1335-1348 (2014).
- [37] M.D. Tier, T.S. Rosendo, J.F. dos Santos, N. Huber, J.A. Mazzaferro, C.P. Mazzaferro, T.R. Strohaecker, The influence of refill FSSW parameters on the microstructure and shear strength of 5042 aluminium welds, *J. Mater. Process. Technol.* 213 (2013) 997–1005.
- [38] Y. Bozkurt, S. Salman, G. Çam, Effect of welding parameters on lap shear tensile properties of dissimilar friction stir spot welded AA 5754-H22/2024-T3 joints, *Sci. Technol. Weld. Join.* 18 (2013) 337–345.
- [39] World Auto Steel. (2021, November 29). Advanced High-Strength Steel (AHSS) Definitions. WorldAutoSteel. <https://www.worldautosteel.org/steelbasics/automotive-advanced-high-strength-steel-ahss-definitions/>
- [40] Jing, Y., Xu, Y., Wang, D., Lu, L., Li, J., & Yu, Y. (2022, May). Improving mechanical properties of welds through tailoring microstructure characteristics and fracture mechanism in multi-pulse resistance spot welding of Q&P980 steel. *Materials Science and Engineering: A*, 843, 143130.
- [41] Cheah LW. Cars on a diet: the materials and energy impacts of passenger vehicle weight reductions in the U.S. Massachusetts Institute of Technology, USA, 2010.
- [42] Tolouei, R., & Titheridge, H. (2009, August). Vehicle mass as a determinant of fuel consumption and secondary safety performance. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 14(6), 385–399.
- [43] Broughton, J. (1996, January). The British index for comparing the accident record of car models. *Accident Analysis & Prevention*, 28(1), 101–109.
- [44] Soomro, I. A., Pedapati, S. R., & Awang, M. (2021, February 8). Double Pulse Resistance Spot Welding of Dual Phase Steel: Parametric Study on Microstructure, Failure Mode and Low Dynamic Tensile Shear Properties. *Materials*, 14(4), 802. <https://doi.org/10.3390/ma14040802> 7. Eisazadeh, H., Hamedi, M., & Halvaei, A. (2010).
- [45] New parametric study of nugget size in resistance spot welding process using finite element method. *Materials & Design*, 31(1), 149–157. 8. Raelison, R. N., Fuentes, A., Pouvreau, C., Rogeon, P., Carré, P., & Dechalotte, F. (2014).
- [46] Modeling and numerical simulation of the resistance spot welding of zinc coated steel sheets using rounded tip electrode: Analysis of required conditions. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9–10), 2505–2521.

- [47] Pfeifer, M. (2009). *Materials Enabled Designs: The Materials Engineering Perspective to Product Design and Manufacturing* (1st ed.). ButterworthHeinemann.
- [48] Groover, M. P. (2010). *Fundamentals of Modern Manufacturing: Materials, Processes, and Systems* (4th ed.). Wiley.
- [49] Gupta, O. P., & De, A. (1998). An Improved Numerical Modeling for Resistance Spot Welding Process and Its Experimental Verification. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 120(2), 246–251.
- [50] Zhang, H., & Senkara, J. (2005). *Resistance Welding*. Taylor & Francis.
- [51] Zhao, Y., Zhang, Y., & Lai, X. (2018, September 26). Analysis of Fracture Modes of Resistance Spot Welded Hot-Stamped Boron Steel. *Metals*, 8(10), 764.
- [52] Liu, X., Xu, Y., Misra, R., Peng, F., Wang, Y., & Du, Y. (2019, January). Mechanical properties in double pulse resistance spot welding of Q&P 980 steel. *Journal of Materials Processing Technology*, 263, 186–197.
- [53] Kim, J. W., Murugan, S. P., Yoo, J. H., Ashiri, R., & Park, Y. D. (2019, October 21). Enhancing nugget size and weldable current range of ultra-high-strength steel using multi-pulse resistance spot welding. *Science and Technology of Welding and Joining*, 25(3), 235–242.
- [54] Eftekharimilani, P., van der Aa, E., Hermans, M., & Richardson, I. (2017, January 12). Microstructural characterisation of double pulse resistance spot welded advanced high strength steel. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(7), 545–554. [55] Lee, H. T., & Chang, Y. C. (2020, September 24). Effect of Double Pulse Resistance Spot Welding Process on 15B22 Hot Stamped Boron Steel. *Metals*, 10(10),
- [56] Wei, F., Zhu, Y., Tian, Y., Liu, H., Zhou, Y., & Zhu, Z. (2022, September 25). Resistance Spot-Welding of Dissimilar Metals, Medium Manganese TRIP Steel and DP590. *Metals*, 12(10), 1596.
- [57] Chabok, A., Cao, H., van der Aa, E., & Pei, Y. (2022, March). New insights into the fracture behavior of advanced high strength steel resistance spot welds. *Journal of Materials Processing Technology*, 301, 117433.
- [58] Li, Y., Wei, Z., Li, Y., Shen, Q., & Lin, Z. (2013). Effects of cone angle of truncated electrode on heat and mass transfer in resistance spot welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 65, 400–408.
- [59] H. M. Mallaradhy, V. Kumar M, R. Ranganatha, S. Darshan, and Lochan, “Resistance Spot Welding, A Review,” *Int. J. Mech. Prod. Eng. Res. Dev.*, vol. 8, pp. 403–418, Apr. 2018,
- [60] P. Podržaj, I. Polajnar, J. Diaci, and Z. Kariž, “Overview of resistance spot welding control,” vol. 13, no. 3, pp. 215–224, May 2013,

- [61] H. Zhang and J. Senkara, Resistance welding: Fundamentals and applications, second edition. 2011.
- [62] S. Shafee, B. B. Naik, and K. Sammaiah, "Resistance Spot Weld Quality Characteristics Improvement By Taguchi Method," *Mater. Today Proc.*, vol. 2, no. 4–5, pp. 2595–2604, 2015,
- [63] L. H. Shah and M. Ishak, "Review of Research Progress on Aluminum–Steel Dissimilar Welding," <http://dx.doi.org/10.1080/10426914.2014.880461>, vol. 29, no. 8, pp. 928–933, Aug. 2014, doi: 10.1080/10426914.2014.880461.
- [64] M. P. Mubiayi and E. Akinlabi, "Friction Stir Welding of Dissimilar Materials between Aluminium Alloys and Copper - An Overview," undefined, 2013.
- [65] K. Martinsen, S. J. Hu, and B. E. Carlson, "Joining of dissimilar materials," *CIRP Ann.*, vol. 64, no. 2, pp. 679–699, Jan. 2015.
- [66] M. Pouranvari, "Critical assessment 27: dissimilar resistance spot welding of aluminium/steel: challenges and opportunities," vol. 33, no. 15, pp. 1705–1712, Oct. 2017,
- [67] K. Miyamoto, S. Nakagawa, C. Sugi, H. Sakurai, and A. Hirose, "Dissimilar joining of aluminum alloy and steel by resistance spot welding," *SAE Tech. Pap.*, pp. 58–67, 2009.
- [68] N. Chen, H. P. Wang, B. E. Carlson, D. R. Sigler, and M. Wang, "Fracture mechanisms of Al/steel resistance spot welds in lap shear test," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 243, pp. 347–354, May 2017.